

ARTICLE PRINCIPAL

RECOUVRANT EN TOUT

LA THÈSE DE DOCTORAT ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PRÉSENTÉE

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

PAR

LOUIS MUSÉ

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

Sujet de la thèse

**Première prospection magnéto-tellurique
dans le bassin sédimentaire saharien**

(Description, particularités, théorie et interprétation, appareillage)

soutenue le 22 octobre 1969 devant la Commission d'Examen

MM. CAGNIARD..	Président.
DELLOUE . . . }	Examineurs.
MECHLER . . . }	
COLOT }	Invités.
ORTYNSKI . . }	



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41551519_0036

PREMIÈRE PROSPECTION MAGNÉTO-TELLURIQUE DANS LE BASSIN SÉDIMENTAIRE SAHARIEN (DESCRIPTION, PARTICULARITÉS, THÉORIE ET INTERPRÉTATION, APPAREILLAGE) (*)

PREMIÈRE PARTIE

L. MUSÉ

S. N. Repal ⁽¹⁾.

De nombreuses mesures magnéto-telluriques ont été systématiquement réalisées dans un domaine géographique présentant un double intérêt, d'une part à cause de sa situation et d'autre part à cause de son rôle de gisement pétrolier d'importance mondiale. Il s'agit en effet du champ d'Hassi-Messaoud, situé en plein bassin sédimentaire saharien.

Les caractéristiques des phénomènes telluriques et magnétiques observés présentent des aspects qualitatifs et quantitatifs originaux dont la description et l'interprétation s'adressent à la fois au physicien et à l'industriel.

En effet, outre une analyse, et ses conclusions, du comportement statistique des champs tellurique et magnétique pendant une durée relativement longue, ainsi que la description de manifestations telluriques curieuses, le lecteur découvrira un nouvel aspect de la méthode de prospection magnéto-tellurique dont le rôle jusqu'ici a surtout concerné la grande et moyenne reconnaissance des bassins sédimentaires. Dans le cas présenté, effectivement, la méthode magnéto-tellurique apparaît comme un outil de grande finesse, permettant de suivre directement dans le détail l'évolution d'un paramètre très important pour le producteur et le prospecteur, à savoir l'épaisseur de l'eau salée située au contact de l'huile dans les couches poreuses productrices, et cela, quelle que soit la profondeur desdites couches.

En outre, par ailleurs, les difficultés traditionnelles inhérentes à la mesure correcte des variations magnéto-telluriques se sont trouvées accrues à la fois par la nature des terrains rencontrés et par les conditions de travail en pays désertique. Aussi fut-il nécessaire de concevoir et de réaliser un dispositif de mesure nouveau, assurant de nombreux avantages à la fois dans la mise en œuvre et dans le dépouillement des enregistrements.

A great many magneto-telluric measurements were made systematically in a geographical area that is of dual interest both for its location and because of its role as an oilfield of worldwide importance. It is the field of Hassi-Messaoud located in the middle of the Sahara sedimentary basin.

The characteristics of the telluric and magnetic phenomena observed have original qualitative and quantitative aspects, and their description and interpretation are presented for both physicists and businessmen.

(*) Les éléments de cet article ont été tirés de la thèse de docteur d'État ès sciences physiques de L. Musé, soutenue le 22 octobre 1969 à la *Faculté des Sciences de l'Université de Paris*.

(1) L'auteur de cet article ne fait plus actuellement partie de cette société.

In addition to making an analysis of the statistical behavior of the telluric and magnetic fields over a relatively long period and then drawing conclusions from this analysis, and in addition to a description of curious telluric happenings, this article presents a new aspect of the magneto-telluric prospection method whose role has thus far mainly concerned the large- and medium-scale reconnaissance of sedimentary basins. In this case, the magneto-telluric method effectively appears to be an extremely delicate tool enabling the variations of an important parameter for producers and prospectors to be followed directly and in detail. This parameter is the thickness of the salt-water nappe in contact with the oil in porous producing layers, no matter how deep these layers may be.

In addition, standard difficulties inherent in the correct measurement of magneto-telluric variations are heightened both by the nature of the formations encountered and by the working conditions in desertic regions. Therefore, a new measuring device had to be designed and built so as to combine various advantages in its use as well as in interpreting the recordings.

Numerosas medidas magneto-telúricas han sido realizadas de manera sistemática en un dominio geográfico que presenta un doble interés, por una parte a causa de su situación y por otra a raíz de su papel de yacimiento petrolero de importancia mundial. Se trata en efecto del campo de Hassi Messaoud situado en plena cuenca mediterránea.

Las características de los fenómenos telúricos y magnéticos observados presentan aspectos cualitativos y cuantitativos originales cuya descripción e interpretación interesan a la vez al físico y al industrial.

En efecto, además de un análisis y sus conclusiones del comportamiento estadístico de los campos telúricos y magnéticos durante un período relativamente largo, lo mismo que la descripción de manifestaciones telúricas curiosas, el lector descubrirá un nuevo aspecto del método de prospección magneto-telúrico cuyo papel hasta el momento se refería al reconocimiento grande y mediano de las cuencas sedimentarias. En el caso presentado, efectivamente, el método magneto-telúrico aparece como un instrumento de gran fineza, que permite de seguir directamente en el detalle la evolución de un parámetro muy importante para el productor y el especialista en prospección, es decir el espesor del agua salada situada en contacto del petróleo en las capas porosas productivas cualquiera sea la profundidad de dichas capas.

Además, por otra parte, las dificultades tradicionales inherentes a la medida correcta de las variaciones magneto-telúricas se encuentran aumentadas a la vez por la naturaleza de los terrenos encontrados y por las condiciones de trabajo en país desértico. También fué necesario concebir y realizar un nuevo dispositivo de medida, que asegurará numerosas ventajas a la vez en realización y en la lectura de los registros.



ABRÉVIATIONS ET SYMBOLES

Conditions physiques.

l	: longueur ;
t	: temps ;
$\Delta t, \Delta t', \Delta t''$	: intervalles de temps de durée relativement courte ;
$\Delta \tau$	: intervalle de temps de durée relativement longue ;
z	: profondeur ;
Δz	: épaisseur ;
ε	: constante diélectrique relative au vide ;
μ	: perméabilité magnétique relative au vide ;
ρ, ρ_1, ρ_2	: résistivités ;
ρ_a	: résistivité apparente ;
$\sigma, \sigma_1, \sigma_2$	: conductibilités.

Technologie électrique, électronique et mécanique.

A	: amplificateur linéaire ;
El_1, El_2	: électrodes ;
E_1	: module de tension tellurique amplifiée attaquant l'amplificateur A ;
C, C_g	: capacité de différents condensateurs ;
Ca_1, Ca_2	: types de capteurs magnétiques à induction ;
$C_{f1}^f(t)$	: tension filtrée issue d'une chaîne d'enregistrement où figure Ca_1 et concernant la fréquence f_1 ;
$C_{f2}^f(t)$	: tension filtrée issue d'une chaîne d'enregistrement où figure

	Ca ₂ et concernant la fréquence f_2 ;		champ tellurique durant un intervalle de temps ;
f, f_1, f_2, f_0, f_g	: fréquences en hertz ;	$E_{(T)_c}$	: valeur centrale mise en évidence lorsque l'on procède à une statistique des valeurs $E_{(T)}$;
g_1, g_2	: gains d'amplification ;	h	: champ magnétique naturel considéré comme variable en fonction du temps ;
G_1, G_2	: gains d'amplification ;	H	: amplitude du champ magnétique naturel pour une période T ;
G_{tel}, G_{mag}	: somme des gains affichés respectivement sur la voie d'enregistrement tellurique et sur la voie d'enregistrement magnétique ;	H_y	: amplitude du champ magnétique naturel pour une période T selon la direction OY ;
i, i_1, i_2	: courants électriques dans divers circuits des chaînes d'enregistrement ;	$H_y(z)$	: H_y considéré comme fonction de la profondeur z ;
I, I_1, I_2	: modules des courants précédents dans le cas d'excitations de forme harmonique ;	$H_{(T)}$	: valeur moyenne, pour une période T , de l'amplitude du champ magnétique naturel durant un intervalle de temps $\Delta\tau$;
$\mathcal{I}_1, \mathcal{I}_2$	: valeurs moyennes de tensions filtrées ;	$H_{(T)_c}$	: valeur centrale mise en évidence lorsque l'on procède à une statistique des valeurs $H_{(T)}$;
k	: rapport de vitesses de défilement d'un même enregistrement sur bande magnétique ;	p	: vecteur de Hertz ;
k_1, k_2	: constantes d'appareillages introduites par les filtres ;	P	: module du vecteur de Hertz ;
L, L_1, L_2, L_3	: coefficients de self induction ;	P_x	: module du vecteur de Hertz suivant la direction OX ;
M	: coefficient d'induction mutuelle ;	$R(E)_c, R(E)_s$	: fonctions calculées théoriquement représentant un rapport de champ électrique ;
R, R_1, R_2, R_3	: résistances électriques de divers éléments ;	$R(H)_c, R(H)_s$	: fonctions calculées théoriquement représentant un rapport de champ magnétique ;
$U(t)$	: tension périodique intervenant en cours d'opération de filtration ;	$R(E)_{ex}$	: série de valeurs expérimentales définies par $E_{(T)_c}/E_{(T=400s)_c}$;
θ	: déphasage dans un circuit ;	$R(H)_{ex}$	: série de valeurs expérimentales définies par $H_{(T)_c}/H_{(T=400s)_c}$;
$\mathcal{K}$	: constante d'appareillage due à l'emploi du générateur de distorsions ;	T, T_0, T_1, T_2	: différentes valeurs de périodes ;
ξ	: impédance d'entrée d'amplificateur linéaire ;	u	: tension électrique naturelle existant entre deux points de la surface du sol ;
Ξ	: impédance de circuit ;	$U_{tel}(t)$	: tension issue de la voie tellurique et fixée au cours de l'enregistrement sur la bande magnétique ;
$\Pi(t)$	: tension périodique modulée intervenant en cours d'opération de filtration ;	$U_{mag}(t)$	: tension issue de la voie magnétique et fixée au cours de l'enregistrement sur la bande magnétique ;
φ	: déphasage dans un circuit ;	$V_T(t)$	: variations en fonction du temps du module de la composante spectrale de période T intervenant dans $U_{tel}(t)$;
$\chi, \chi_{Ca1}, \chi_{Ca2}$	: constantes d'appareillage définissant la surface totale effective déterminant le flux d'induction à travers un bobinage soumis à l'excitation d'un champ magnétique ;	$W_T(t)$	: variations en fonction du temps du module de la composante spectrale de période T intervenant dans $U_{mag}(t)$;
ψ	: déphasage dans un circuit.	Θ	: décalage de phase pour une période T du champ magnétique par rapport au champ électrique ;
		Φ, Ψ	: arguments complexes intervenant dans la définition de Θ ;
Électromagnétisme.			
e	: champ tellurique considéré comme variable en fonction du temps ;		
E	: amplitude du champ tellurique pour une période T ;		
E_x	: amplitude du champ tellurique pour une période T selon la direction OX ;		
$E_x(z)$	: E_x considéré comme fonction de la profondeur z ;		
$E_{(T)}$	: valeur moyenne, pour une période T , de l'amplitude du		

Ω	: vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans un milieu donné ;	Δ	: laplacien vectoriel ;
$\omega, \omega_1, \omega_2, \omega_e, \omega_g$	: différentes pulsations en régime harmonique.	$\mathcal{R}$	: rapport d'intégrales permettant d'obtenir le rapport E/H.

Désignation d'unités.

Opérateurs mathématiques.			
d	: dérivée ;	F	: farad ;
δ	: différentielle partielle de ;	mV/km	: millivolt par kilomètre ;
rot	: rotationnel ;	γ	: gamma ;
grad	: gradient ;	$\Omega \cdot m$	: ohm • mètre ;
		Hz	: hertz ;
		s	: seconde.

INTRODUCTION

I. Historique et objet du présent article.

L'exposé qu'on va lire se fonde sur les résultats d'une campagne de mesures magnéto-telluriques comprenant environ 200 sondages.

Ce travail de terrain a été effectué durant une tranche de temps de l'ordre d'une année et dans la région du champ pétrolier d'Hassi-Messaoud, sur la concession de la *Société Nationale de Recherche et d'Exploitation des Pétroles en Algérie* (S. N. Repal) et ses abords. Quelques bretelles d'exploration ont également été poussées parfois d'une façon indépendante jusqu'à 200 km de la concession elle-même.

Le dépouillement de cette masse importante de données expérimentales apporte un certain nombre de renseignements physiques et géophysiques, qui sont exposés dans le premier chapitre de cette étude, sous le titre : « Les données physiques ».

Dans le deuxième chapitre, intitulé « Essais d'interprétation », tout en se basant sur les données géologiques concernant la région, on présente plusieurs hypothèses pour mieux faire cadrer entre eux les phénomènes retenus.

Au passage, une application capitale de la méthode magnéto-tellurique est mise en évidence : il s'agit de la possibilité dans certains cas de déterminer la limite d'extension de gisements pétroliers.

Dans la troisième chapitre enfin, plus particulièrement consacré au côté expérimental de l'étude, le système ayant servi de procédé de mesure est expliqué et l'on montre ses avantages en fonctions des conditions imposées par les caractéristiques du phénomène naturel. Cette dernière tranche de l'ouvrage est nommée « Le processus d'enregistrement et d'analyse ».

II. Les principes mis en œuvre pour la prospection M. T.

Il est indispensable de rappeler tout d'abord les principes mis en œuvre pour la prospection magnéto-tellurique. On sait que les courants électriques naturels, dits courants telluriques, qui circulent dans le sol, subissent des fluctuations incessantes ; on sait qu'il en est de même du champ magnétique terrestre. Or, les fluctuations des courants telluriques et celles du champ magnétique ne sont pas indépendantes. D'une façon générale, les variations qu'éprouvent les trois composantes du champ magnétique et celles des deux composantes horizontales du champ électrique sont liées de façon plus ou moins compliquée, mais toujours quantitative, par les lois de l'électro-

magnétisme. Dans le cas particulier d'un sol constitué de couches superposées de terrains homogènes et présentant une morphologie tabulaire ou pratiquement tabulaire, ces relations se simplifient considérablement compte tenu de l'uniformité bien connue des courants telluriques. En effet, lesdites relations ne font plus intervenir alors qu'une seule composante horizontale quelconque du champ électrique et la composante horizontale du champ magnétique qui lui est orthogonale. Quoi qu'il en soit, comme ces relations dépendent de la résistivité électrique du sol sous-jacent, elles fournissent la possibilité de déterminer, donc de connaître cette résistivité.

Lesdites variations magnéto-telluriques ne présentent pas le caractère de variations sinusoïdales, mais sont d'une grande complexité. On peut considérer toutefois qu'elles résultent de la superposition de variations sinusoïdales de périodes diverses. D'une manière plus précise, on peut dire que le spectre des variations magnétiques ainsi que celui des variations telluriques correspondantes sont des spectres plus ou moins continus d'où l'on peut extraire à peu près n'importe quelle période T par le moyen d'une filtration électrique appropriée. D'autre part, il résulte de l'effet pelliculaire ou « skin effect » que les courants telluriques se concentrent d'autant plus dans le voisinage de la surface du sol que la période des variations est plus courte. La résistivité déterminée à partir des périodes les plus courtes du spectre est donc celle des couches superficielles. Inversement, à mesure que l'on considère des périodes de plus en plus grandes, les résistivités mesurées intéressent des couches de plus en plus profondes. Il y a donc un intérêt pratique, géologique et industriel à pouvoir mesurer et analyser les variations magnéto-telluriques.

CHAPITRE I

LES DONNÉES PHYSIQUES

Ces différents points étant précisés, nous estimons nécessaire, dans un premier temps, de présenter au lecteur les différents aspects des phénomènes magnétiques et telluriques avec lesquels nous avons été confronté.

Les caractéristiques, parfois peut-être curieuses, mises ainsi en évidence, reposent sur des observations provenant, ainsi qu'il est dit plus haut, d'un ensemble d'environ 200 sondages magnéto-telluriques d'exploration auxquels il nous faut ajouter de nombreuses mesures de mise au point, mesures préalables à la détermination judicieuse de toute méthode de travail dans une région inconnue.

Nous ordonnerons ces phénomènes magnétiques et telluriques sous deux rubriques :

- I. Les phénomènes de grandes périodes ;
- II. Les phénomènes de périodes moyennes et courtes :
 - A. le phénomène proprement dit ;
 - B. les décharges telluriques.

I. Les phénomènes de grandes périodes.

Sous ce titre, nous allons aborder les variations magnéto-telluriques dont le spectre s'étale dans la bande $5 \text{ s} < T < 400 \text{ s}$.

Pour étudier cette première catégorie de phénomènes électromagnétiques, nous isolerons, parmi l'ensemble de résultats expérimentaux que nous avons à notre disposition, 125 sondages magnéto-

telluriques dont la qualité nous est apparue comme particulièrement bonne. Les mesures obtenues au cours de ces sondages sélectionnés vont donc plus particulièrement constituer le matériau de base de notre étude, en ce qui concerne cette partie du spectre électromagnétique.

Nous ajouterons que la répartition de ces sondages tout au long de l'année 1968 est à peu près uniforme, et qu'ils se distribuent sur une région de forme à peu près rectangulaire, d'une surface de 4 000 km². Les horaires quotidiens d'enregistrement ont pris place en général entre 5 h du matin et 16 h. Toutefois, de nombreuses mesures de mise au point et de contrôle sont intervenues en dehors de ces limites, en particulier au début et au milieu de la nuit. D'autre part, les nombreuses données géologiques obtenues par de multiples forages montrent qu'il n'y a pas lieu d'attendre dans ladite région des variations lithologiques importantes et des pendages insolites. Autrement dit, les bases expérimentales que nous allons classer et tenter d'analyser concernent une région vaste, homogène, et proviennent en outre de mesures obtenues de manière à peu près régulière dans un intervalle de temps étendu puisqu'il est de l'ordre d'une année.

Le rappel de ces caractéristiques a pour but de justifier le fait d'avoir soumis nos mesures à un classement statistique et, partant, de justifier le sens donné ultérieurement audit classement.

A. Définition succincte du processus d'enregistrement et d'analyse des mesures ainsi obtenues.

On sait que le but du géophysicien pratiquant la magnéto-tellurique est d'enregistrer et de déterminer quantitativement, pour chaque période T prise isolément dans un spectre donné, le rapport E/H des amplitudes respectives des variations du champ tellurique et des variations du champ magnétique correspondant. Les corrélations entre lesdites variations étant reconnues comme de bonne qualité, le géophysicien peut alors, à partir dudit rapport E/H, expliciter la fonction appelée résistivité apparente qui est particulièrement commode pour l'exploitant industriel et le géologue, car elle est, par définition, homogène à une résistivité.

Rappelons en passant l'expression très importante de la résistivité apparente telle qu'elle est donnée par L. Cagniard (1) :

$$\rho_a = 0,2 T \left[\frac{E}{H} \right]^2$$

La résistivité apparente ρ_a est exprimée en ohms · mètres :

$$1 \Omega \cdot m = 10^5 \text{ em. C. G. S.}$$

T est exprimé en secondes.

Le champ électrique E est exprimé en millivolts/kilomètre :

$$1 \text{ mV/km} = 1 \text{ em. C. G. S.}$$

Le champ magnétique H est exprimé en gammas :

$$1 \gamma = 10^{-5} \text{ em. C. G. S.}$$

Le procédé de travail que nous utilisons pour enregistrer sur le terrain et ensuite obtenir en fonction de T les rapports E/H, et par conséquent les résistivités apparentes, sera exposé en détail dans la troisième partie de cet ouvrage. Toutefois, afin que le lecteur ne puisse mettre en cause le résultat, capital à nos yeux, du classement statistique de nos mesures, il apparaît comme nécessaire de donner dès maintenant un exposé succinct du processus suivi à cet égard.

a. « Conditions terrain » de nos enregistrements.

Les 125 sondages magnéto-telluriques sur lesquels nous nous appuyons ont été effectués en utilisant une seule ligne tellurique de 500 m de long, dont la direction était choisie empiriquement comme étant celle où les effets des décharges telluriques perturbatrices, que nous aurons l'occasion d'étudier ci-après, présentaient le niveau le plus faible au moment où nous nous apprêtions à réaliser la mesure. Ce choix étant fait, le capteur magnétique, qui se présentait sous l'aspect d'un capteur à induction constitué d'un bobinage à grand nombre de spires enroulées sur une barre de mu-métal, était bien entendu soigneusement calé, de telle manière que l'axe de la barre soit orthogonal à la direction de la ligne tellurique ; autrement dit pour chacun des 125 sondages, nous avons enregistré une seule composante tellurique horizontale et la composante magnétique horizontale correspondante. Pour prévenir immédiatement les objections quant aux résultats que pourrait soulever cette manière de travailler, nous dirons tout de suite que la décision de procéder ainsi ne fut prise qu'après avoir systématiquement constaté durant une période d'essai de deux mois, et en de nombreux endroits différents, que la courbe de résistivité apparente obtenue en un point donné de la région considérée restait identique, même si l'on répétait les mesures à plusieurs jours d'intervalle et en orientant l'ensemble des dispositifs capteurs telluriques et magnétiques selon des azimuts différents d'un jour à l'autre.

b. Le procédé de mesure proprement dit.

L'originalité du procédé de mesure que nous utilisons consiste à insérer sur la chaîne d'enregistrement tellurique un dispositif que nous avons appelé « générateur de distorsions » et dont la présence permet de faire subir au signal électrique naturel des distorsions en amplitudes et en phase, entre l'entrée et la sortie de ladite chaîne d'enregistrement tellurique. Ces distorsions sont déterminées de telle manière qu'elles soient identiques en fonction de la période aux distorsions subies par le signal magnétique naturel entre l'entrée et la sortie de la chaîne d'enregistrement magnétique.

Ainsi que cela vient d'être dit plus haut, c'est dans le troisième chapitre que nous développerons les aspects théoriques et pratiques du système que nous avons utilisé.

Disons seulement, en attendant, que les courbes de réponse et les bandes passantes des deux chaînes d'enregistrement sont rigoureusement identiques.

Les signaux issus des deux chaînes sont alors déposés au cours d'enregistrements de l'ordre d'une heure et demie à deux heures sur bande magnétique.

c. Analyse des tensions enregistrées.

Vient alors le deuxième stade du processus de détermination du rapport E/H , stade qui est constitué par l'analyse en fonction de T des tensions fixées sur la bande magnétique.

Ces tensions sont filtrées grâce à une paire de filtres analogiques fabriqués par le docteur P. Yu, directeur de la firme américaine AD. Yu, auprès de laquelle toute précision technologique désirée pourra être obtenue. Voici toutefois une brève description du fonctionnement de ces appareils dont on peut voir sur la planche 1 une représentation des conditions d'utilisation (fig. 1) et un schéma de principe (fig. 2).

On constate que lesdits filtres se composent en fait de trois unités. La première n'est autre qu'un générateur de fonction périodique qui envoie une tension de fréquence f_g et de forme $U_g \cos \omega_g t$ dans la deuxième unité qui joue le rôle de convertisseur de fréquence. Cette deuxième unité, en effet, comporte entre autres un oscillateur à cristal qui crée une tension de la forme $U_c \sin \omega_c t$.

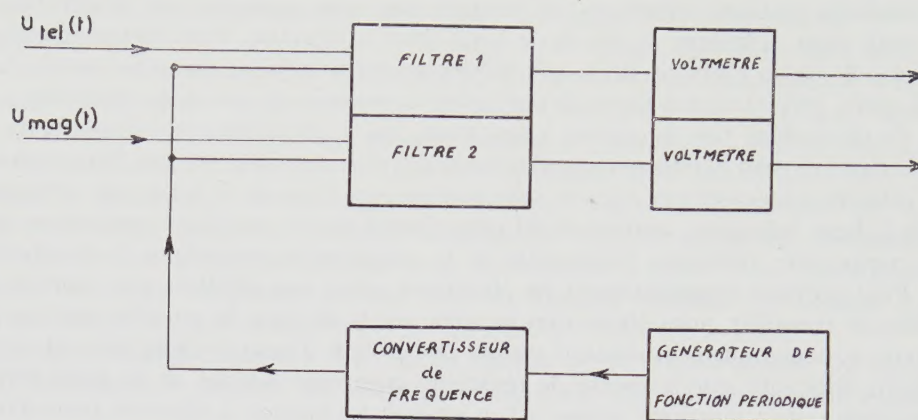


Fig. 1

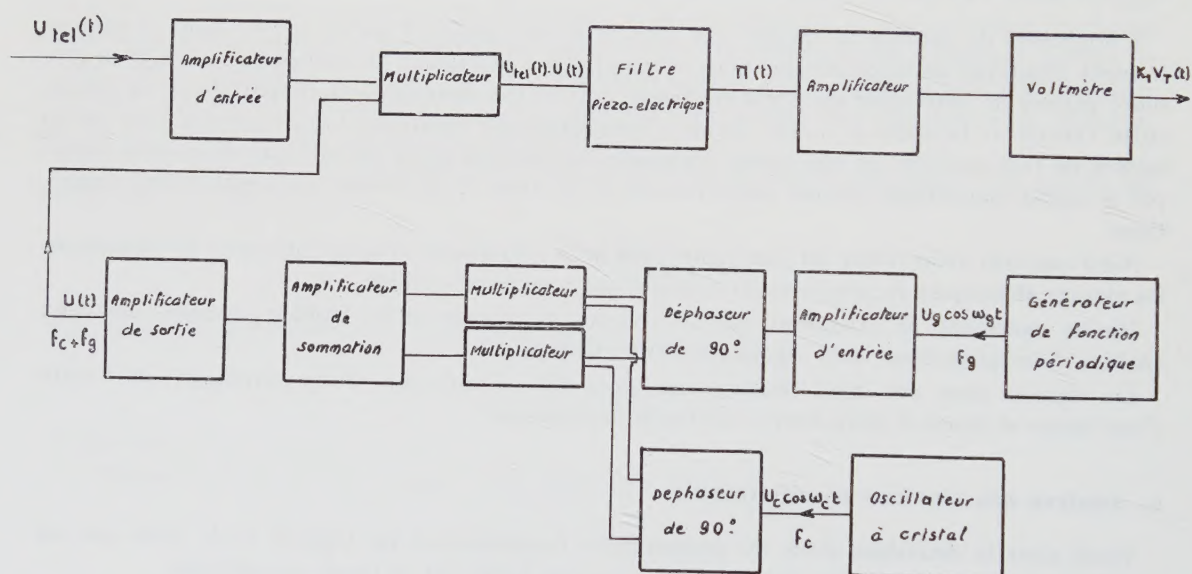


Fig. 2

PLANCHE I.

Après différentes opérations, on recueille en sortie du convertisseur de fréquence une tension périodique de la forme :

$$U(t) = A \cdot U_g \cdot U_c \sin(\omega_g + \omega_c) t$$

où A est une constante d'appareillage et U_g et U_c sont des amplitudes constantes.

Dans le cas précis envisagé :

$$f_c = \frac{\omega_c}{2\pi} = 20,5 \text{ kHz}$$

La tension $U(t)$ pénètre à son tour dans la troisième unité où l'opération de filtration proprement dite s'effectue de la manière suivante :

Soit $U_{\text{tel}}(t)$ la tension issue de la voie tellurique et fixée au cours de l'enregistrement sur la bande magnétique. Désignons par $V_T(t)$ les variations du module de la composante spectrale relative à la période $T = \frac{2\pi}{\omega_g}$ durant l'enregistrement de $U_{\text{tel}}(t)$. Supposons maintenant que $U_{\text{tel}}(t)$ pénètre

dans l'un des filtres. Dans un premier temps, il est tout d'abord procédé au produit $U(t) \cdot U_{\text{tel}}(t)$. La tension ainsi obtenue aboutit sur un filtre piézo-électrique accordé sur la fréquence $f_c = \frac{\omega_c}{2\pi}$ identique à la fréquence d'oscillation du cristal rencontré dans le convertisseur. Ce filtre piézo-électrique a pour propriété de ne pouvoir transmettre qu'une tension périodique de période $T_c = \frac{2\pi}{\omega_c}$; autrement dit, il ne laissera passer que la tension $\Pi(t)$ de la forme :

$$\Pi(t) = V_T(t) \cdot A \cdot U_g \cdot U_c \cdot \sin \omega_c t$$

où le terme $A \cdot U_g \cdot U_c$ constitue le module de la tension de fréquence f_c dite fréquence porteuse, et où $V_T(t)$ se présente sous l'aspect d'une modulation de ladite tension.

Après amplification, la tension $\Pi(t)$ est recueillie par un voltmètre qui, compte tenu de la valeur élevée de la fréquence porteuse, n'est sensible qu'aux fluctuations de $V_T(t)$.

Autrement dit, on obtient alors en sortie du filtre YU sur la voie tellurique une tension pseudo-continue, proportionnelle à $V_T(t)$, qui peut être représentée par l'expression $k_1 \cdot V_T(t)$, où k_1 est une constante qui tient compte des valeurs des termes A , U_g , U_c , et des coefficients d'amplification introduits éventuellement lors du passage à travers le filtre.

Bien entendu, les mêmes opérations sont effectuées parallèlement dans l'autre filtre à partir de la tension $U_{\text{mag}}(t)$ issue de la voie magnétique au cours du même enregistrement. Si $W_T(t)$ représente les variations du module de la composante spectrale relative à la période $T = \frac{2\pi}{\omega_g}$ de

la tension durant l'enregistrement de $U_{\text{mag}}(t)$, après passage à travers le filtre, on obtiendra également en sortie de voltmètre une tension pseudo-continue proportionnelle à $W_T(t)$ qui pourra à son tour être représentée par l'expression $k_2 \cdot W_T(t)$.

Pour procéder à une analyse spectrale en fonction de la période T , il suffit donc de jouer sur la période de la tension émise par le générateur.

La bande de fonctionnement des filtres que nous avons utilisés était comprise entre 10 Hz et 10 kHz. Aussi, malgré leurs performances remarquables, il est facile de comprendre qu'il y a encore beaucoup à faire pour analyser un spectre s'étendant de 400 s à 2 s ($2,5 \cdot 10^{-3}$ Hz — $5 \cdot 10^{-1}$ Hz).

Aussi, tout naturellement, avons-nous eu recours au remède classique dans un tel cas : grâce à un jeu de deux enregistreurs magnétiques, il est possible de rejeter d'un appareil sur l'autre les tensions enregistrées jusqu'à ce que l'on ait, grâce aux possibilités des différentes vitesses de défilement des bandes magnétiques, condensé enfin sur une bande magnétique terminale l'enregistrement

initial sous la forme d'un enregistrement de durée k fois plus petite. Si k égale par exemple 4 000, et si le filtre utilisé est centré sur 10 Hz, les tensions filtrées concernent alors la fréquence $2,5 \cdot 10^{-3}$ Hz, c'est-à-dire la période $T = 400$ s.

Les tensions sortant des filtres sont alors tracées graphiquement sur un papier dont on choisit judicieusement la vitesse de déroulement, compte tenu de la période à filtrer. On peut voir sur les planches 2, 3 et 4 un exemple d'un tel travail où un même enregistrement initial à large spectre a été soumis à une série de filtrations successives.

Ajoutons qu'en tenant compte des bandes passantes exactes des chaînes d'enregistrement et d'analyse, il a été possible de rétablir en ordonnées le niveau réel des champs naturels excitateurs.

L'examen de ces graphiques illustre assez bien les conclusions suivantes qui nous sont apparues après une année de mesures dans la région considérée.

1) Les corrélations obtenues dans la région du spectre allant de 400 s à 25 s environ sont de très bonne qualité. En fait, cette observation est encore valable jusqu'à des périodes $T = 10$ s environ.

2) On constate également que, étant donné une fréquence isolée artificiellement dans le spectre, le niveau des champs électriques et magnétiques est constamment variable au cours du temps.

3) Le spectre ne possède pas à chaque instant la même richesse et les rapports à un instant t du niveau du champ électrique pour une période T_1 au niveau du champ électrique pour une période T_2 varient d'une manière absolument aléatoire en fonction du temps. Cette observation est également valable naturellement pour le champ magnétique.

4) On observe avec une certaine surprise peut-être que le décalage de phase existant entre variations du champ électrique et variations du champ magnétique apparaît, sur les graphiques présentés, comme pratiquement égal à zéro, quelle que soit la période T considérée. Ce fait requiert à vrai dire deux explications distinctes. La première concerne surtout les périodes inférieures et égales à 100 s : prenons d'ailleurs cette dernière valeur de période comme exemple pour fixer les ordres de grandeur auxquels on doit s'attendre. Supposons a priori que le décalage de phase relatif à la période $T = 100$ s soit égal au décalage de phase maximal prévu par la théorie, soit 50 gr. Converti en intervalle de temps, cela donne 12,5 s ; or l'échelle utilisée dans la présentation de la planche 3 fait correspondre une durée d'enregistrement de 1 h 30 mn à une longueur de 16,5 cm environ reportée en abscisse. Par conséquent, 12,5 s de décalage de phase se traduisent alors par une longueur de 0,382 mm, ce qui rend ledit décalage de phase fort peu perceptible à l'œil. Cette conclusion vaut, bien entendu, *a fortiori* pour les périodes plus courtes que 100 s.

Si maintenant on considère les tensions filtrées relatives aux périodes plus grandes que 100 s, et en particulier celles qui correspondent à la période $T = 400$ s, un décalage de phase de 50 gr va être représenté par une longueur de 1,53 mm dans le mode de tracé utilisé, ce qui doit être perceptible à l'œil. Mais, ainsi qu'on le verra plus loin à la page 1147, le calcul du décalage de phase théorique, effectué à partir d'un modèle de terrain représentatif de la région étudiée, nous donne, pour la période $T = 400$ s, des valeurs particulièrement faibles de l'ordre de 2 gr, d'où, même pour les périodes les plus grandes, l'absence apparente de décalage de phase.

d. Obtention des rapports E/H.

Nous arrivons enfin à la dernière partie du processus destiné à donner les résistivités apparentes. Ce point sera également développé dans la troisième partie. Disons simplement qu'étant donné, pour une période T , une tension filtrée tellurique et la tension magnétique correspondante, on choisit sur ces deux graphiques les régions qui apparaissent comme présentant entre elles les meilleures corrélations. On détermine alors rigoureusement deux abscisses t_2 et t_1 . Dans l'intervalle $t_2 - t_1 = \Delta t$, on procède alors à une intégration de la fonction tension tellurique. On effectue la même opération sur la partie correspondante de la tension magnétique. La valeur de l'intervalle Δt restant la même, les valeurs t_1 et t_2 sont bien entendu différentes sur les deux voies compte tenu du décalage de phase

PLANCHES 2, 3 et 4.

Résultats d'analyse de mesures effectuées à l'occasion d'un sondage magnéto-tellurique.

Durée totale d'enregistrement : 1 h 30.

Les tensions filtrées sont ici représentées ramenées à l'entrée et étalonnées en unité de champ excitateur. Cependant en exploitation normale la connaissance du seul rapport des surfaces, $\mathcal{R}$, tel qu'il est calculé détermine, à une constante d'appareillage près, la résistivité apparente.

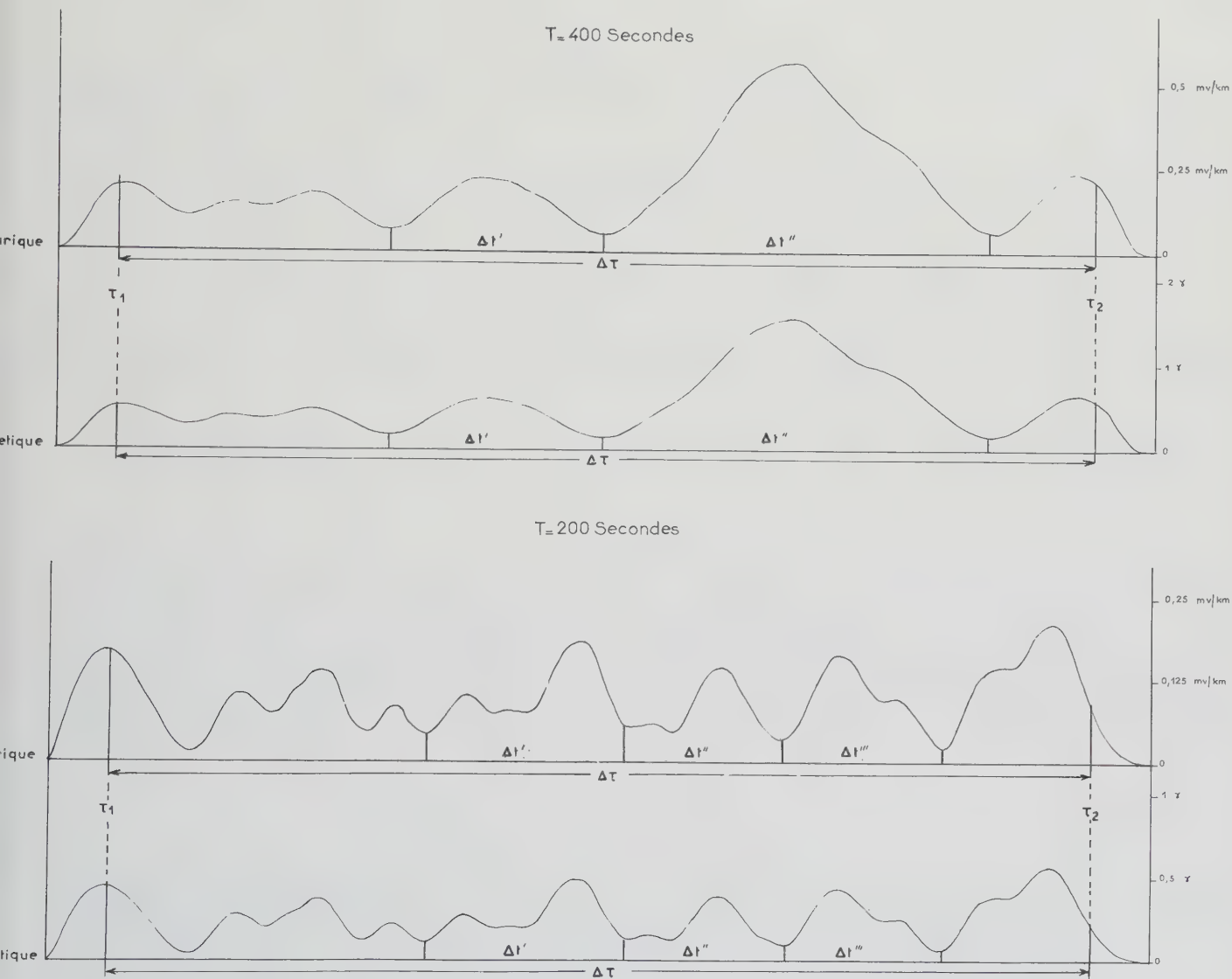


PLANCHE 2.

$T = 400 \text{ s} :$

$$\rho_a = 10,2 \Omega \cdot \text{m.}$$

$$\Delta t' = 3 \text{ fois période considérée : } \mathcal{R} = 1,45 ;$$

$$\Delta t'' = 5,3 \text{ fois période considérée : } \mathcal{R} = 1,45.$$

$T = 200 \text{ s} :$

$$\rho_a = 5,4 \Omega \cdot \text{m.}$$

$$\Delta t' = 5,6 \text{ fois période considérée : } \mathcal{R} = 1,5 ;$$

$$\Delta t'' = 4,3 \text{ fois période considérée : } \mathcal{R} = 1,5 ;$$

$$\Delta t''' = 4,5 \text{ fois période considérée : } \mathcal{R} = 1,5.$$

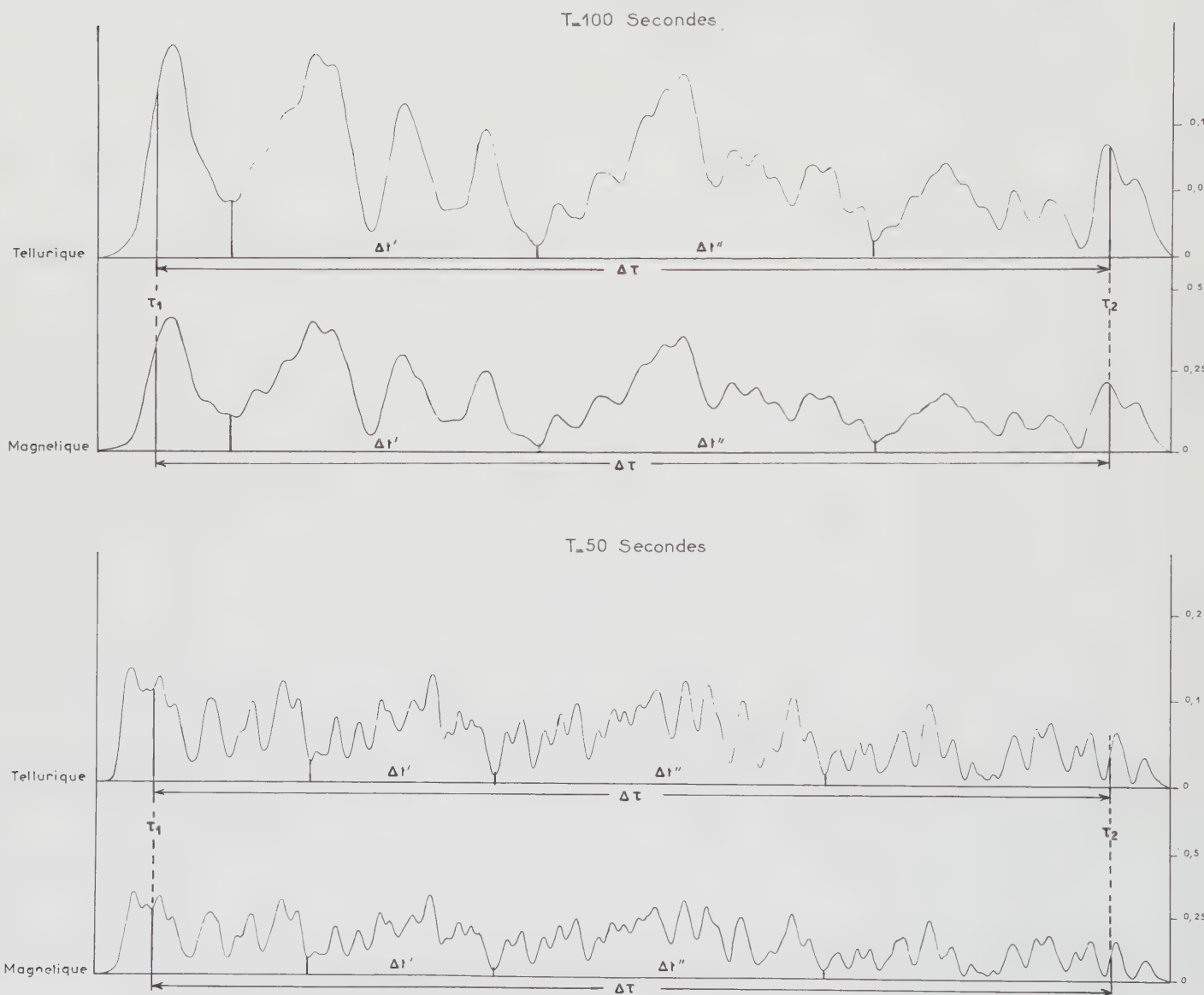


PLANCHE 3.

T 100 s :

$$\rho_a = 3,1 \Omega \cdot m.$$

$$\Delta t' = 17,6 \text{ fois période considérée : } \mathcal{R} = 1,61;$$

$$\Delta t'' = 19,2 \text{ fois période considérée : } \mathcal{R} = 1,61.$$

T - 50 s :

$$\rho_a = 1,76 \Omega \cdot m.$$

$$\Delta t' = 21 \text{ fois période considérée : } \mathcal{R} = 1,37;$$

$$\Delta t'' = 38 \text{ fois période considérée : } \mathcal{R} = 1,37.$$

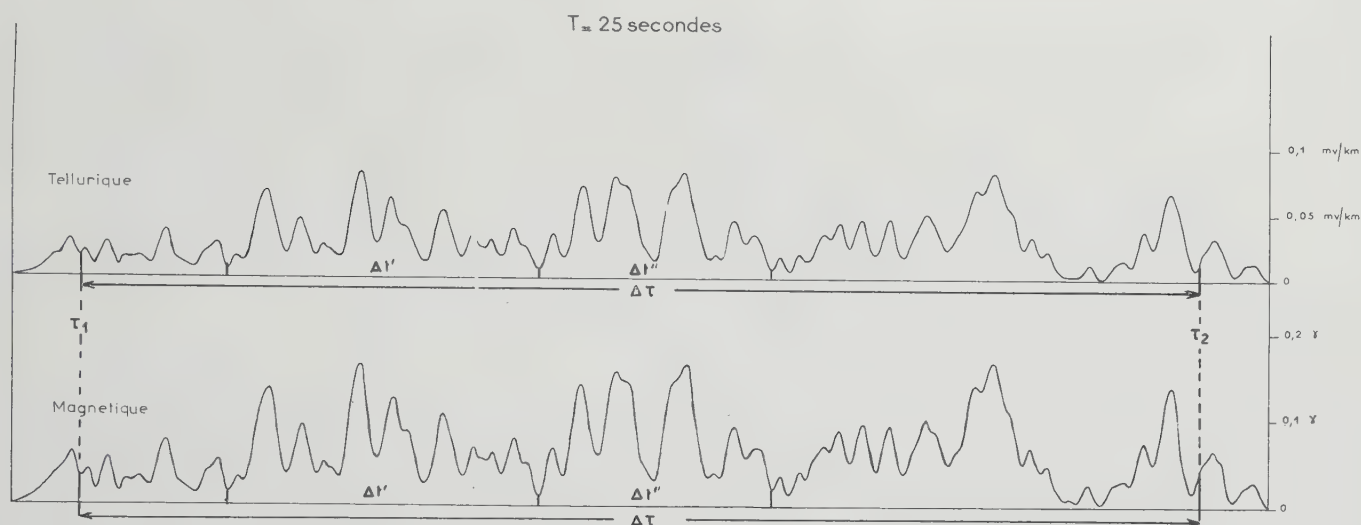


PLANCHE 4.

T = 25 s :

$$\rho_a = 1,05 \, \Omega \cdot \text{m.}$$

$$\Delta t' = 60 \text{ fois période considérée : } \mathcal{R} = 0,75 ;$$

$$\Delta t'' = 45 \text{ fois période considérée : } \mathcal{R} = 0,75.$$

du champ magnétique par rapport au champ tellurique, mais, pour les raisons invoquées plus haut, ce fait à peu d'incidence pratique sur le processus de calcul mis en œuvre. Signalons au passage que la valeur exacte de ce décalage de phase est trop difficile à obtenir expérimentalement pour que l'on puisse songer à en tirer des conclusions vraiment utiles.

Grâce aux simplifications de calcul introduites, ainsi qu'on le verra dans la troisième partie de cet ouvrage, par le fait d'utiliser le générateur de distorsions au cours de l'enregistrement, le rapport des intégrales

$$\mathcal{R} = \frac{\frac{k_1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} V_T(t) dt}{\frac{k_2}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} W_T(t) dt} = \frac{k_1}{k_2} \cdot \frac{\int_{t_1}^{t_2} V_T(t)}{\int_{t_1}^{t_2} W_T(t)}$$

sans qu'il soit nécessaire dans le cas considéré d'étalonner $k_1 \cdot V_T(t)$ et $k_2 \cdot W_T(t)$ en champs excitateurs ramenés à l'entrée, est directement assimilable, à une constante près d'appareillage et indépendante de T, au rapport E/H recherché pour exprimer la résistivité apparente. Cette opération peut être répétée à nouveau sur plusieurs intervalles de temps Δt . Les résultats ainsi obtenus nous ont permis de vérifier la constance dans le temps du rapport E/H.

Nous ferons remarquer que, lorsque l'on passe de la détermination du rapport E/H pour une période T_1 à celui concernant la période T_2 , il n'y a aucune raison de conserver, pour effectuer les calculs de valeurs moyennes, les mêmes intervalles de temps. On se contente, compte tenu du fait vu plus haut, que la richesse du spectre varie constamment, de choisir pour chaque période les intervalles d'intégration Δt , où la valeur du niveau et la qualité des corrélations sont maximales.

Nous ajouterons enfin que, dans le choix des intervalles Δt , nous avons toujours évité d'inclure

les tranches de temps correspondant au début ou à la fin des opérations de filtration, alors même que les tensions filtrées semblent, pour une période donnée, parfaitement corrélées entre elles.

Cette manière de procéder résulte du fait que le début ou la fin de chaque enregistrement est accompagné par l'apparition brutale, sur chacune des voies de l'enregistreur magnétique, d'une même tension d'assez fort niveau due à l'enclenchement ou au déclenchement des relais commandant la mise en route ou l'arrêt de cet appareil. Bien entendu, cette tension, au cours de l'analyse spectrale, donne des corrélations qu'il faudra soigneusement rejeter pour ne pas fausser les rapports E/H .

B. Processus de détermination des statistiques.

Après ce rappel succinct du procédé d'enregistrement, d'analyse et de calcul que nous utilisons, nous allons maintenant préciser la manière dont nous avons bâti nos statistiques concernant les phénomènes situés dans les grandes périodes. Pour cela, revenons plus haut à l'examen des graphiques des planches 2, 3 et 4 donnant en fonction de T les niveaux des champs filtrés excitateurs pendant l'enregistrement.

Il ne s'agit plus maintenant de choisir à propos de chaque période T un ou plusieurs intervalles Δt où les tensions filtrées présentent le niveau moyen le plus élevé possible en vue de retenir uniquement les corrélations où le rapport « signal/bruit » est le plus favorable. Ce que nous nous proposons en effet, c'est la détermination d'un seul intervalle de temps le plus long possible, défini une fois pour toutes directement sur l'enregistrement brut initial, et qui restera le même pour toutes les tensions filtrées, quelle que soit la période considérée et ce naturellement dans la mesure où l'aspect des corrélations obtenues reste acceptable. Nous emploierons la notation $\Delta\tau$ pour distinguer ce type d'intervalle de temps de ceux utilisés pour le calcul de E/H et désignés par le symbole Δt . Bien entendu, pour les mêmes raisons déjà exposées un peu plus haut, ces intervalles $\Delta\tau$ excluent, au même titre que les intervalles Δt déjà définis, les débuts et les fins des graphiques représentatifs des tensions filtrées.

Le choix d'un intervalle $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$ aussi grand que possible ayant été effectué à propos de chacun de nos 125 sondages magnéto-telluriques, nous avons, pour chacun de ces sondages et pour chaque période retenue, calculé les valeurs moyennes des fonctions $k_1 \cdot V_T(t)$ et $k_2 \cdot W_T(t)$ ramenées en niveau de signal naturel à l'entrée des chaînes d'enregistrement, ce qui s'exprime sous la forme :

$$E_{(T)} = \frac{k_1}{\Delta\tau} \int_{\tau_1}^{\tau_2} V_T(t) dt \quad H_{(T)} = \frac{k_2}{\Delta\tau} \int_{\tau_1}^{\tau_2} W_T(t) dt$$

$k_1 \cdot V_T(t)$ représente alors les variations du module du champ tellurique pour la période T ;

$k_2 \cdot W_T(t)$ représente alors les variations du module du champ magnétique naturel pour la période T .

Ces calculs de valeur moyenne période par période, pour le champ tellurique et pour le champ magnétique, ont été systématiquement menés sur nos 125 sondages magnéto-telluriques choisis dans les conditions qui ont été précisées au début de ce chapitre.

Nous avons alors mis en évidence le fait que pour chaque période T donnée, les valeurs moyennes se répartissaient autour d'une valeur centrale qui, manifestement, parmi les 125 en présence, revenait le plus fréquemment. Ce phénomène caractérise d'ailleurs aussi bien les valeurs obtenues pour $E_{(T)}$ que les valeurs obtenues pour $H_{(T)}$. Nous avons appelé $E_{(T)c}$ et $H_{(T)c}$ les valeurs centrales correspondantes.

Nous avons, à titre d'exemple, présenté sur la planche 5 deux graphiques, l'un concernant $E_{(T)}$, l'autre $H_{(T)}$, qui donnent, pour la période $T = 200$ s, la répartition en pourcentage des valeurs moyennes de niveau obtenues.

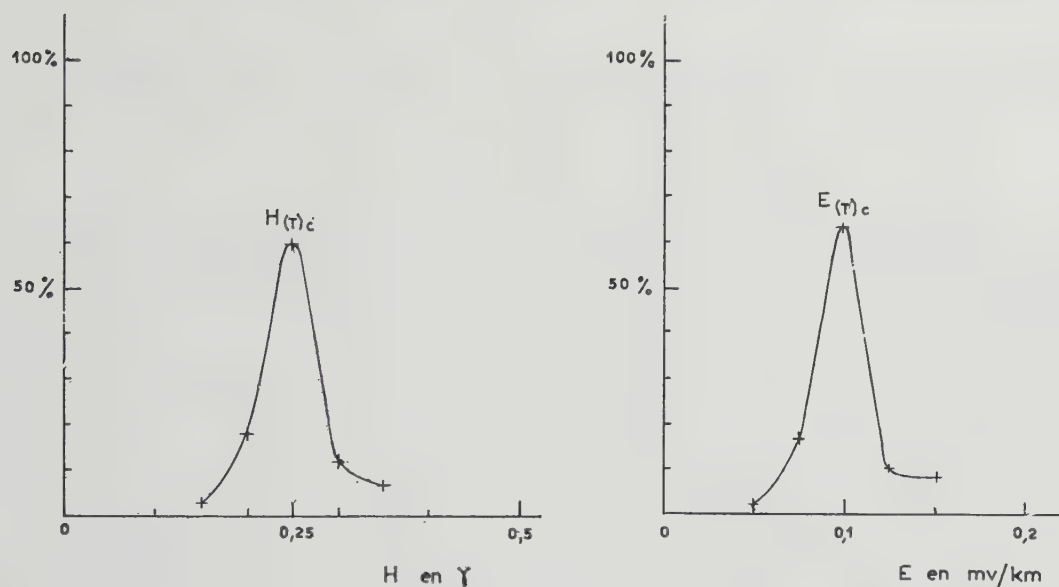


PLANCHE 5.

Répartition statistique pour la période $T = 200$ s des valeurs moyennes du niveau des champs électrique et magnétique dans la région saharienne étudiée.

Ces mesures concernent 125 sondages magnéto-telluriques répartis à peu près uniformément durant le cours de l'année 1968.

Nous avons alors tracé dans un premier temps (planche 6) deux courbes en fonction de T , la première représentant en mV/km la série des valeurs centrales $E_{(T)c}$, et l'autre représentant en γ la série des valeurs centrales $H_{(T)c}$. Dans un deuxième temps (planche 7), nous avons tracé en fonction de T deux courbes issues des précédentes. La première n'est autre que la fonction :

$$R(E)_{\text{ex}} = \frac{E_{(T)c}}{E_{(T=400\text{ s})c}}$$

la seconde :

$$R(H)_{\text{ex}} = \frac{H_{(T)c}}{H_{(T=400\text{ s})c}}$$

l'indice ex signifiant que l'on a affaire à des résultats obtenus expérimentalement et non par calcul théorique.

La question fondamentale qui se pose maintenant est la suivante : quel sens physique attribuer à ces deux séries de courbes ?

Voici notre réponse. Compte tenu des précautions dont nous nous sommes entouré et qui ont déjà été énoncées, et compte tenu que pour chaque période T les valeurs moyennes, aussi bien du module du champ électrique que du module du champ magnétique, ont bien voulu s'organiser de façon à mettre en évidence respectivement la valeur centrale $E_{(T)c}$ et la valeur centrale $H_{(T)c}$, nous estimons que les séries de valeurs $E_{(T)c}$ et $H_{(T)c}$ en fonction de T représentent les valeurs des modules des champs électriques et magnétiques en fonction de la période que l'on aurait mesurés dans la région considérée, si les phénomènes magnéto-telluriques avaient été dus à une excitation comportant des vecteurs périodiques dont les modules se seraient répartis en fonction de T suivant une loi immuable durant l'année 1968 où furent réalisés les 125 sondages.

Quant à la deuxième série de courbes $R(E)_{\text{ex}}$ et $R(H)_{\text{ex}}$, elles expriment en fonction de T les rapports :

$$\frac{E_{(T)_e}}{E_{(T=400\text{ s})_e}} = R(E)_{\text{ex}} \quad \text{et} \quad \frac{H_{(T)_e}}{H_{(T=400\text{ s})_e}} = R(H)_{\text{ex}}$$

lorsque l'éclairement électromagnétique s'exprime sous la forme d'une loi telle que l'on vient de la définir plus haut.

Pour ceux qui éprouveraient certaines difficultés à admettre le sens donné par nous aux séries de valeurs $E_{(T)_e}$ et $H_{(T)_e}$ ainsi qu'aux fonctions $R(E)_{\text{ex}}$ et $R(H)_{\text{ex}}$, nous avancerons un argument qui nous semble assez important.

En effet, lorsque nous considérons l'ensemble de toutes les courbes de résistivité apparente que nous avons obtenues depuis nos débuts dans la région prospectée, nous constatons que toutes ces courbes présentent pratiquement la même allure et sont, avec des formes variables certes, comprises entre deux courbes limites, celle que nous avons appelée courbe de sondage A_1 et celle que nous avons appelée courbe de sondage B_2 (planche 18).

Or il se trouve que si, partant de la série des valeurs $E_{(T)_e}$ et de la série des valeurs correspondantes $H_{(T)_e}$, nous calculons une courbe de résistivité apparente, nous obtenons la courbe « S » (planche 19) qui a tout à fait l'allure des courbes de sondage A_1 et B_2 et même se situe entre les deux courbes en question dans le mode de report utilisé.

Ce phénomène serait bien difficile à obtenir si les valeurs $E_{(T)_e}$ et $H_{(T)_e}$ avaient été issues d'un choix arbitraire ou incorrect.

Ajoutons enfin que l'examen des courbes $E_{(T)_e}$ et $H_{(T)_e}$ vient corroborer par le poids de l'observation statistique la constatation, fondée précédemment sur un exemple, de la faiblesse du niveau naturel des phénomènes électromagnétiques.

II. Les phénomènes de périodes moyennes et courtes.

A. Le phénomène proprement dit.

a. Les phénomènes de périodes moyennes : $1\text{ s} < T < 5\text{ s}$.

Le niveau dans cette région du spectre devient en général extrêmement faible et finit par se confondre la plupart du temps avec le bruit de fond de l'appareillage pour les périodes inférieures ou égales à 5 s, ce qui explique l'arrêt de nos séries de valeurs statistiques $E_{(T)_e}$ et $H_{(T)_e}$ à la période $T = 6\text{ s}$. Toutefois les phénomènes de périodes moyennes se sont rendus perceptibles à nos mesures à l'occasion de quelques sondages réalisés lorsque le niveau général des champs électriques et magnétiques s'est mis à remonter de manière brutale. Pour une période T , on a recueilli alors des tensions quatre ou cinq fois supérieures à la normale. Si l'on traitait alors ces enregistrements exceptionnels selon le procédé nous ayant donné les valeurs $E_{(T)_e}$ et $H_{(T)_e}$ présentées plus haut, les fonctions $R(E)_{\text{ex}}$ et $R(H)_{\text{ex}}$ obtenues en ces occasions inhabituelles montraient que la baisse relative de niveau des modules des champs électriques et magnétiques, nettement évidente pour $5\text{ s} < T < 400\text{ s}$, se poursuivait à mesure que la valeur de T diminuait dans la bande $1\text{ s} < T < 5\text{ s}$.

b. Les phénomènes de périodes courtes : $T < 1\text{ s}$.

Dans la région des périodes inférieures à la seconde, même à l'occasion de la remontée fortuite du niveau général, il ne nous a jamais été possible de mettre en évidence des variations corres-

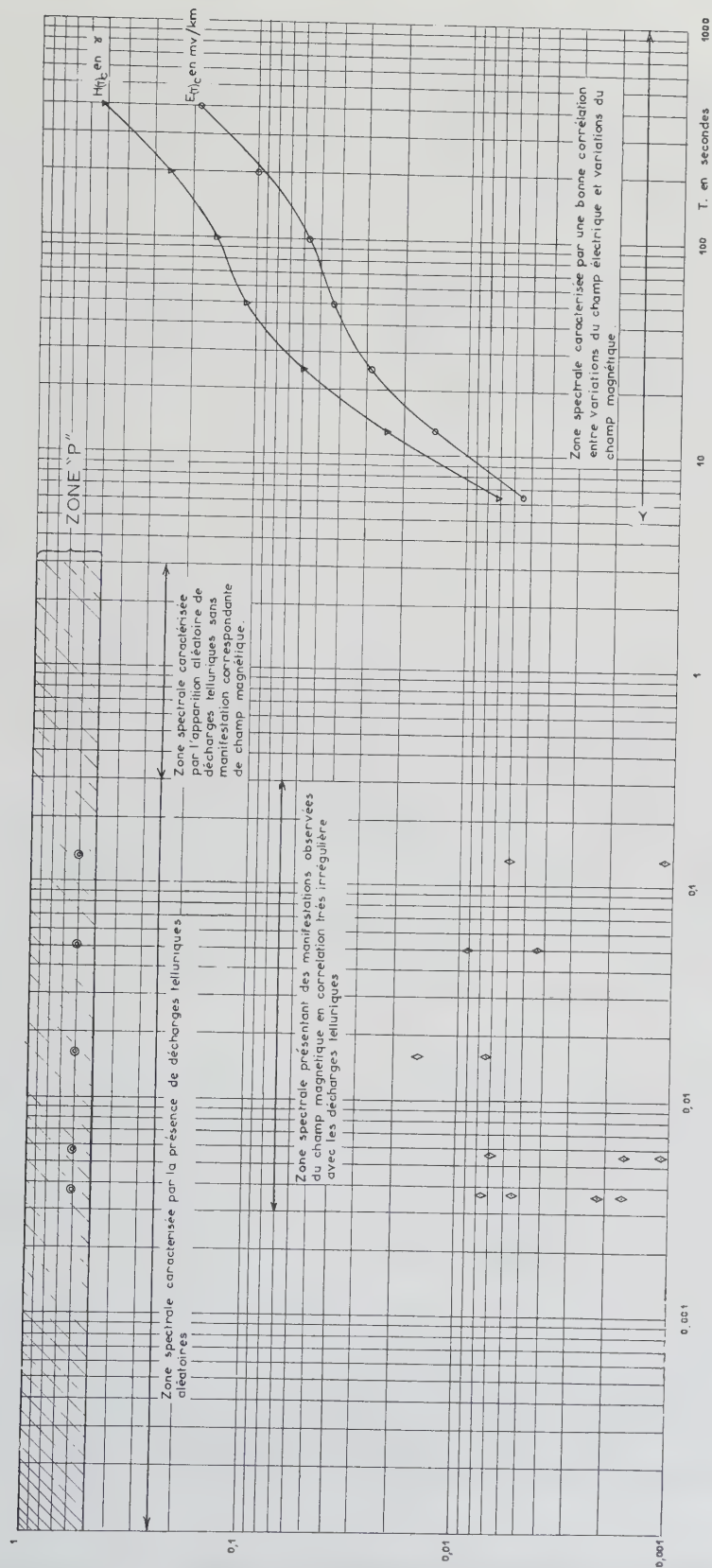


PLANCHE 6.

Diagramme synoptique résumant en fonction de la période la nature, le niveau et le comportement des différents phénomènes électriques et magnétiques observés.

Zone P : Niveau moyen observé ramené à l'entrée des tensions dues aux échanges telluriques. Ce niveau est exprimé en mV pour une longueur de ligne tellurique de 1 km.
 $\odot$: sélection de tensions de 600 μ V ramenées à l'entrée dues aux décharges telluriques choisies pour montrer la dispersion des niveaux $\diamond$ des excitations magnétiques correspondantes exprimées en gamma.

$E(t)_e$ et $H(t)_e$: courbes représentant en fonction de T les valeurs statistiques $E(t)_e$ et $H(t)_e$.

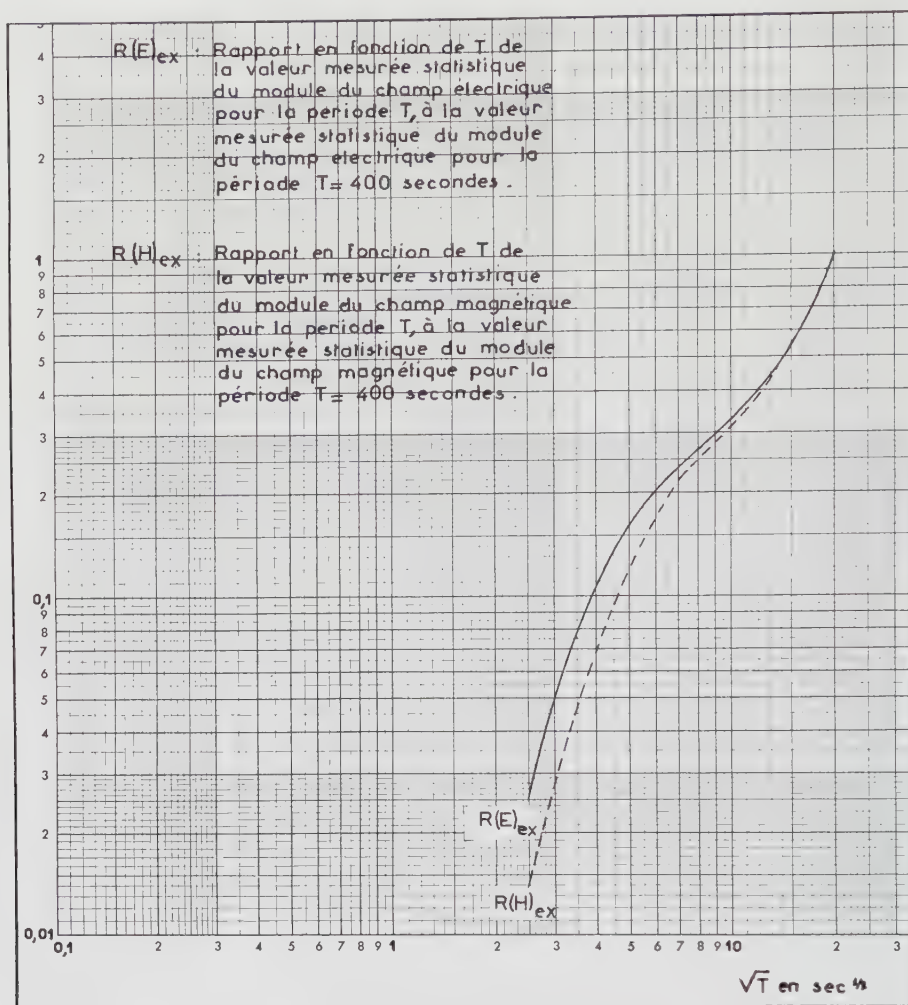


PLANCHE 7.

Fonctions $R(E)_{ex}$ et $R(H)_{ex}$ donnant une représentation statistique du niveau des champs électrique et magnétique en fonction de « T ».

pendant à un régime magnéto-tellurique normal. Tout laisse donc supposer que si variations il y a, elles atteignent des niveaux particulièrement faibles.

B. Les décharges telluriques.

Dans la zone du spectre correspondant à $10^{-4} \text{ s} < T < 3 \text{ s}$, nous avons rencontré un phénomène présent la plupart du temps, bien que parfois s'évanouissant d'une manière imprévisible pour quelques heures et même n'apparaissant pas du tout certains jours. Il s'agit de ce que nous appe-

lons les « décharges telluriques ». D'une façon générale, le niveau de ces phénomènes s'atténue lorsque l'on aborde les grandes périodes. D'une façon plus précise, nous avons rarement eu affaire à des « décharges telluriques » qui à l'analyse présentaient des niveaux importants pour des périodes plus grandes que 3 s. En revanche, la bande de période que nous venons de définir ci-dessus est en fait probablement beaucoup plus étendue vers les courtes périodes que nous n'avons pu le déterminer. En effet, les appareils en général et les filtres en particulier dont nous disposions ne pouvaient fonctionner au-delà de 10 kHz.

Voici maintenant un ensemble de caractéristiques générales concernant les « décharges telluriques ».

1) Elles se présentent sous l'aspect de tensions surgissant brutalement et d'une manière aléatoire aux bornes de la ligne tellurique.

2) Ces tensions, ramenées aux bornes de la ligne tellurique, correspondent à des excitations électriques qui sont d'un niveau particulièrement élevé, atteignant facilement des valeurs de l'ordre de $600 \mu\text{V}/\text{km}$ à $1200 \mu\text{V}/\text{km}$.

3) On pourra constater, en se référant aux différentes planches les concernant, que lesdites tensions analysées grâce aux filtres déjà décrits ont des formes diverses et présentent toutes des départs et des fins très raides, ce qui implique une excitation de forme nettement impulsionnelle.

4) Ayant fixé systématiquement un nombre assez important de décharges telluriques sur bande magnétique et ayant procédé à leur analyse spectrale, il nous est apparu que, pour une décharge tellurique donnée, la valeur moyenne de la tension recueillie était à peu près constante en fonction de T , et cela pour un spectre allant de $10^{-3} \text{ s} < T < 3 \text{ s}$ correspondant aux possibilités de notre enregistreur magnétique. Il est d'ailleurs probable que la constance approximative du module de l'excitation en fonction de T se continue vers des périodes plus courtes.

Pour mieux préciser les différents aspects des décharges telluriques, nous avons, dans la mesure des moyens dont nous disposions, procédé à trois sortes de tests :

α) Détermination d'une corrélation entre la « décharge tellurique » et une éventuelle tension apparaissant aux bornes du capteur magnétique approprié.

Le principe du dispositif de mesure utilisé est alors le même que pour la mesure magnéto-tellurique conventionnelle, à ceci près que les bandes passantes des capteurs et appareils mis en œuvre à cette occasion sont décalées vers les périodes plus petites.

β) Étant donné deux lignes telluriques perpendiculaires de longueur égale (500 m en général), détermination d'une corrélation tellurique-tellurique. Examen des rapports des tensions obtenus dans le cas de corrélation.

γ) Étant donné une ligne tellurique de longueur $l = 500 \text{ m}$ et une deuxième ligne tellurique de longueur $l/2 = 250 \text{ m}$ colinéaire à la première, détermination d'une corrélation tellurique-tellurique. Examen des rapports de tension obtenus en cas de corrélation.

Voyons maintenant ce que nous avons obtenu après application de ces trois tests. Des exemples sont montrés sur les planches 8 à 15 où les résultats des trois tests en question sont présentés fréquence par fréquence sous forme de tensions filtrées grâce aux appareils AD. Vu déjà mentionnés.

a. Zone spectrale : $10^{-1} \text{ s} < T < 3 \text{ s}$.

Test α . Absence totale de manifestations dues à une excitation magnétique correspondant à une « décharge tellurique », donc pas question de la moindre corrélation possible (planche 8).

Test β . La corrélation tellurique-tellurique n'est pas systématique et, lorsqu'elle existe, ne donne pas des rapports de tensions analysées très variables d'une décharge à l'autre (planche 13).

Test γ . Mêmes observations que dans le test β (planche 13).

Nous pouvons dès maintenant tirer une première série de conclusions à partir des caractéris-

tiques générales et des caractéristiques particulières qui viennent d'être exprimées par les trois tests α , β et γ .

En effet, compte tenu d'une part que de 400 s à 5 s, le phénomène magnéto-tellurique normal présente systématiquement dans la région donnée de très bonnes corrélations, et qu'à l'approche de $T = 5$ s, le niveau moyen de champ électrique mesuré est de l'ordre de quelques $\mu\text{V}/\text{km}$, et compte tenu d'autre part que dans la zone spectrale $10^{-1} \text{ s} < T < 3 \text{ s}$, on ne voit aucune variation magnétique se manifester en corrélation avec les « décharges telluriques » qui, par ailleurs, correspondent à des niveaux moyens atteignant 600 à 1 200 $\mu\text{V}/\text{km}$, il nous semble tout à fait logique de conclure que les « décharges telluriques » ne peuvent absolument pas être considérées comme la prolongation vers les périodes plus courtes du phénomène magnéto-tellurique normal et doivent être attribuées à une tout autre origine physique.

Il est facile de conclure par les critères β et γ que le phénomène des décharges telluriques est un phénomène directionnel, nettement polarisé, et pour une décharge tellurique donnée donc probablement localisé d'une manière quelconque dans la région du point de mesure.

b. Zone spectrale $3,6 \cdot 10^{-3} \text{ s} < T < 10^{-1} \text{ s}$.

Test α . Étant donné une décharge tellurique, on commence à voir apparaître une tension de forme impulsionnelle correspondante aux bornes du capteur magnétique. Mais, pour une fréquence donnée, d'une décharge à l'autre, le rapport des tensions captées respectivement sur la voie d'enregistrement magnétique et sur la voie d'enregistrement tellurique varie considérablement (planches 9 et 10).

Test β . La corrélation tellurique-tellurique n'est pas systématique et donne des rapports de tension variables. On observera là encore un déphasage entre deux manifestations dues à une même excitation (planche 11).

Test γ . La corrélation tellurique-tellurique n'est pas systématique (planche 14).

Conclusion. Une décharge tellurique donnée, dans cette bande de période, reste donc un phénomène polarisé et local. Toutefois, et là est l'élément nouveau important, on commence à voir une excitation magnétique en corrélation avec l'apparition d'une décharge tellurique.

c. Zone spectrale $10^{-4} \text{ s} < T < 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ s}$.

Test α . Compte tenu de nos possibilités d'appareillage et en particulier des bandes passantes de nos capteurs magnétiques, il nous a été impossible de constater la présence de tension sur la chaîne d'enregistrement magnétique en corrélation avec des décharges telluriques. Naturellement, il y a tout lieu de supposer que ces corrélations persistent et les tests β et γ donnent à penser que peut-être ladite corrélation est moins dispersée.

Test β . En effet, la corrélation tellurique-tellurique, bien qu'indiquant un rapport de tension différent de 1 donne un rapport constant vers 10 kHz. Le déphasage observé dans la bande précédente persiste (planches 11 et 12).

Test γ . Le rapport des tensions corrélantes, bien que différent de 1 alors même que l'on tient compte de la différence de longueur des deux lignes telluriques, reste constant vers 10 kHz (planches 14 et 15).

Des tests β et γ , on peut conclure que le phénomène des décharges telluriques, bien que polarisé puisque les rapports sont différents de 1, est néanmoins probablement moins localisé puisque les rapports de tensions corrélantes sont moins dispersés. Peut-être y a-t-il d'ailleurs, lorsque la fréquence croît, apparition et superposition de phénomènes physiques d'origines diverses.

En résumé, il semble bien que les décharges telluriques et le phénomène magnéto-tellurique normal constituent deux régimes électromagnétiques bien différents, tant par leur allure que par leur niveau. L'ensemble de ces observations est résumé sur la planche 6.

Test α : Dispositif normal d'enregistrement magnéto-tellurique. La trace supérieure correspond à la voie d'enregistrement tellurique. « A » et « B » sont des enregistrements bruts directement captés par les chaînes de mesure. f_0 = fréquence centrale du système de filtration.

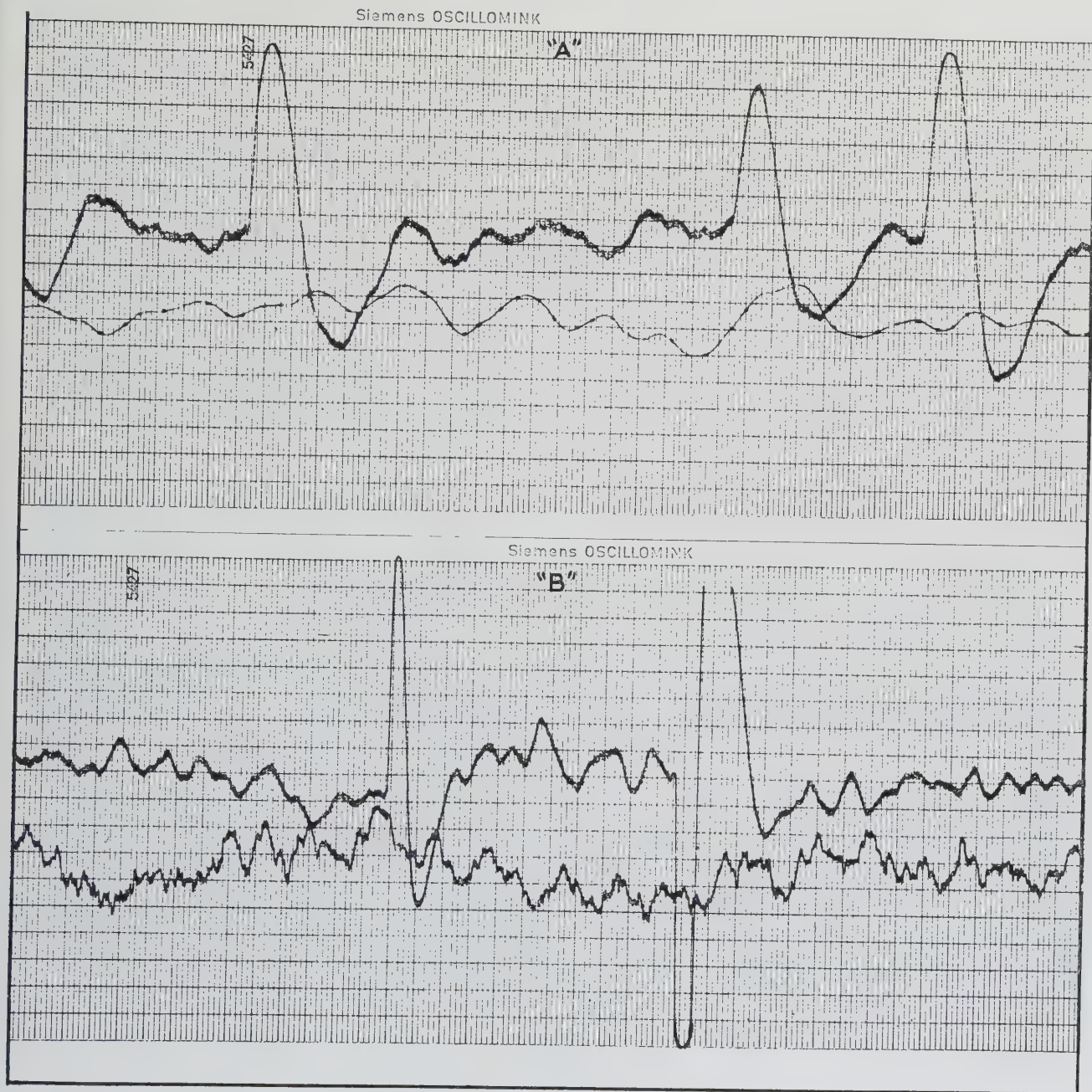


PLANCHE 8.

Test α . Vitesse : 1 cm/s.



PLANCHE 9.

Test α . Vitesse : 1 cm/s. f_0 : 175 Hz.

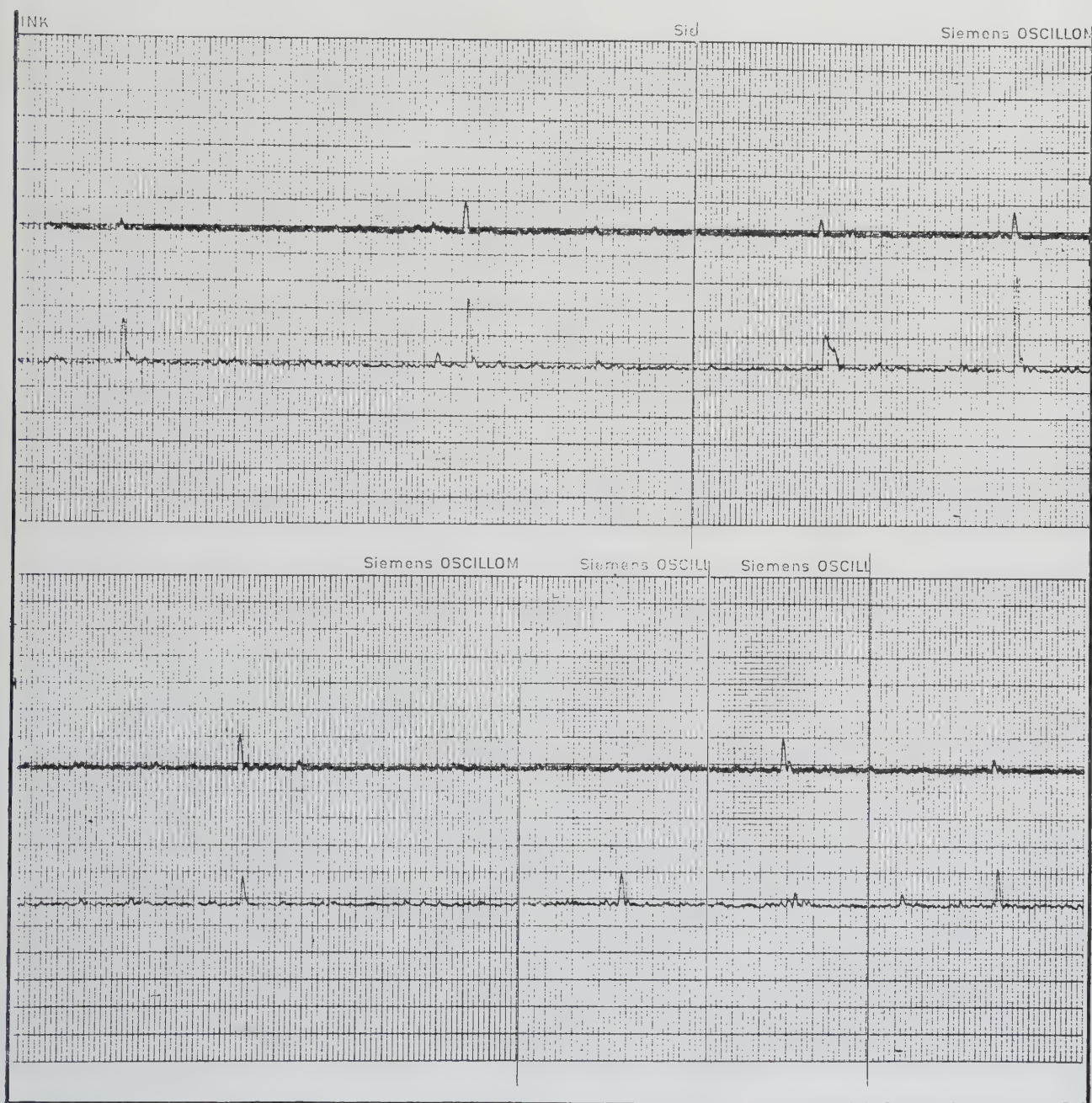


PLANCHE 10.

Test α . Vitesse : 1 cm/s. f_g : 275 Hz.

Test β : Deux lignes telluriques identiques et orthogonales. Tensions filtrées à partir de deux chaînes d'enregistrement identiques. « C » (planche 13) est un enregistrement brut directement capté par les chaînes de mesure. f_0 = fréquence centrale du système de filtration.

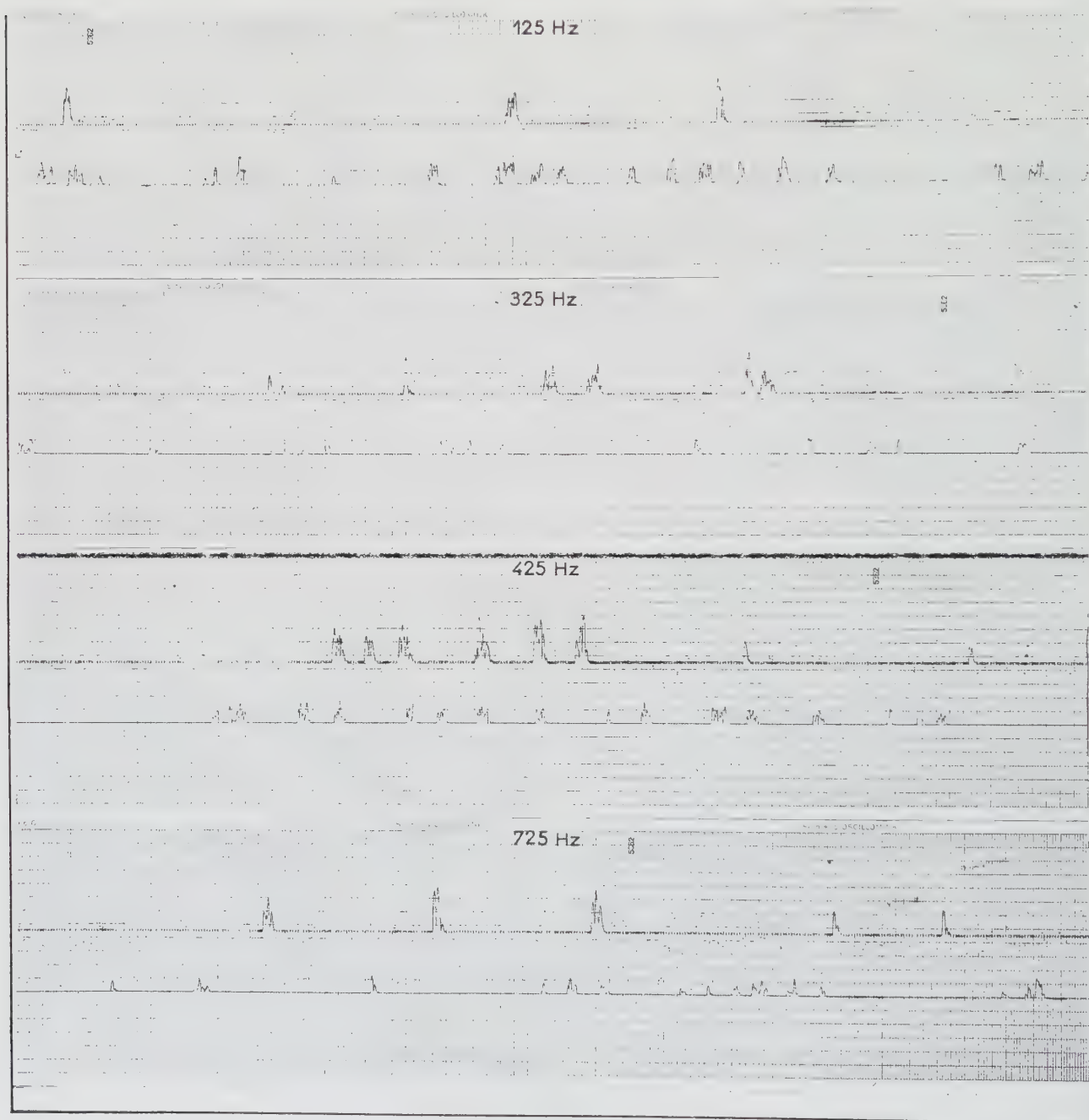


PLANCHE II.

Test « β ». Vitesse : 0,5 cm/s. f_0 en Hz.

(DESCRIPTION, PARTICULARITÉS, THÉORIE ET INTERPRÉTATION, APPAREILLAGE)

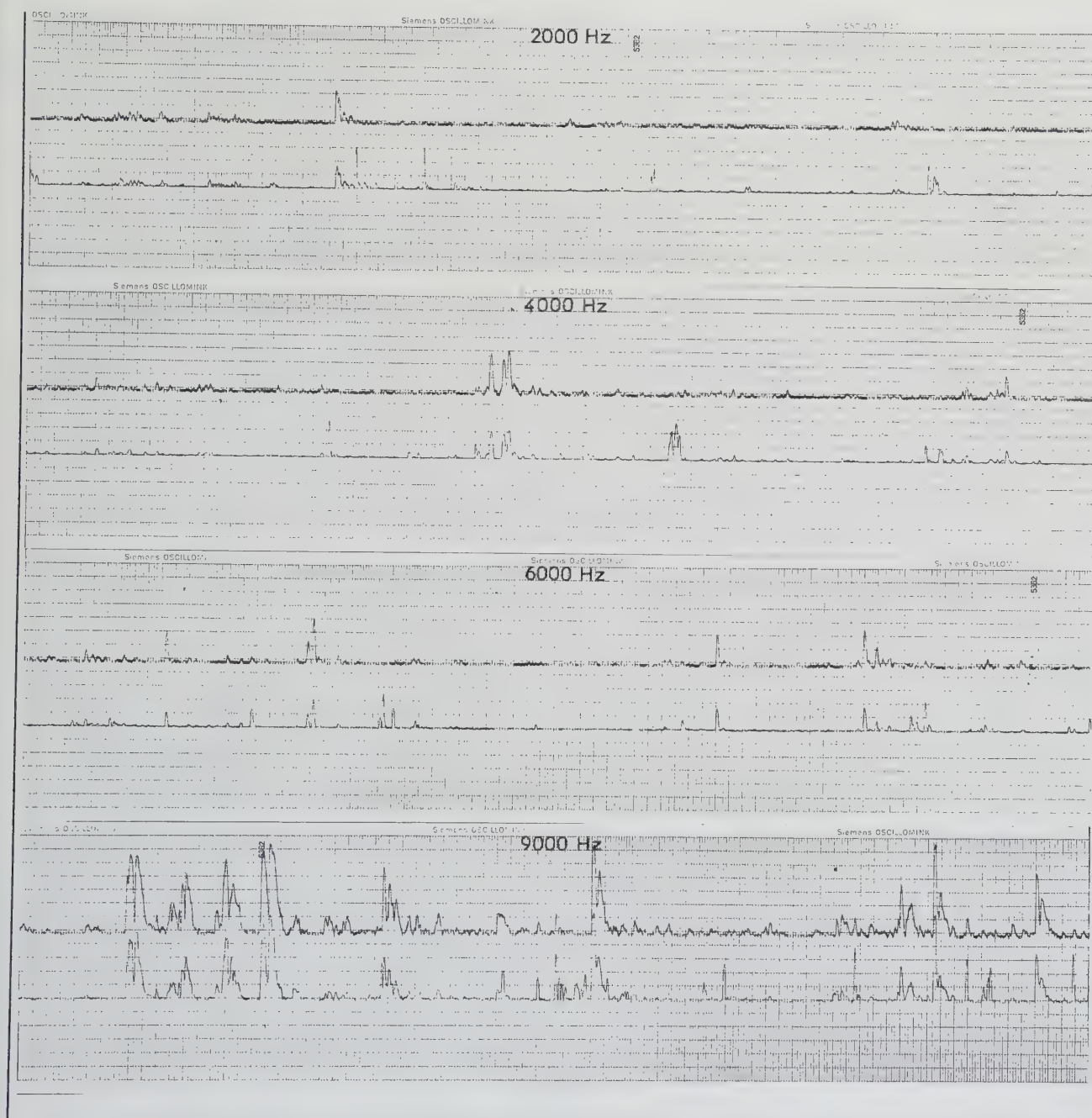
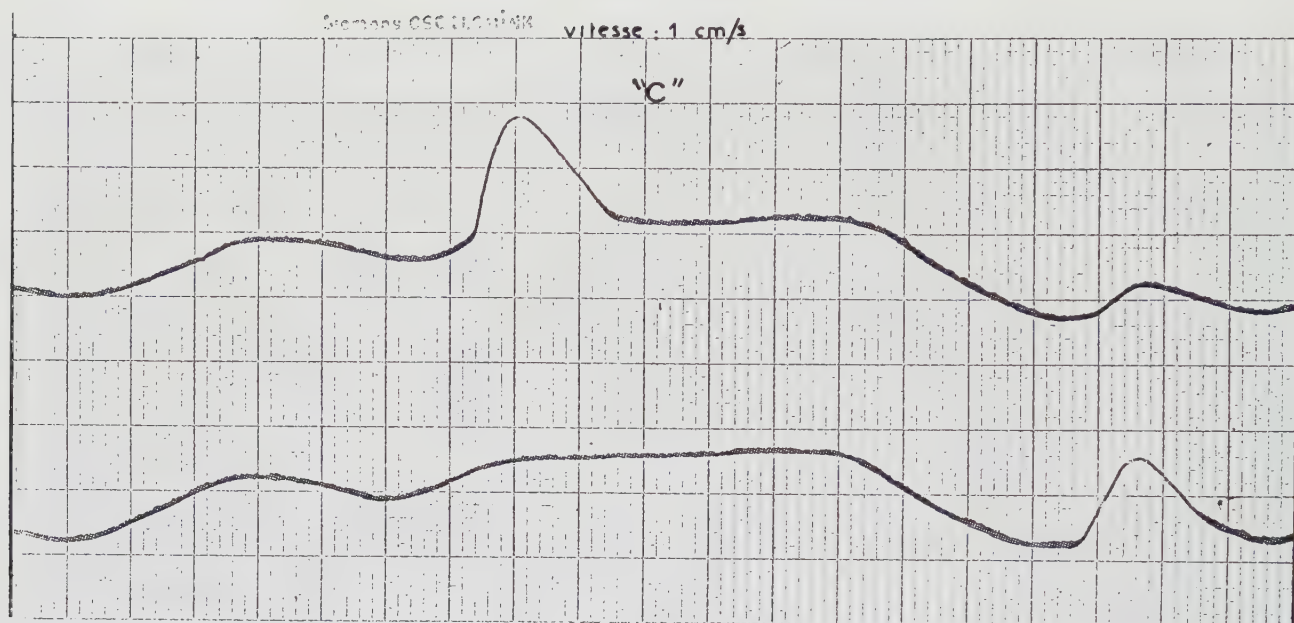


PLANCHE 12.

Test « β ». Vitesse : 0,5 cm/s. f_g en Hz.

TEST β



TEST γ

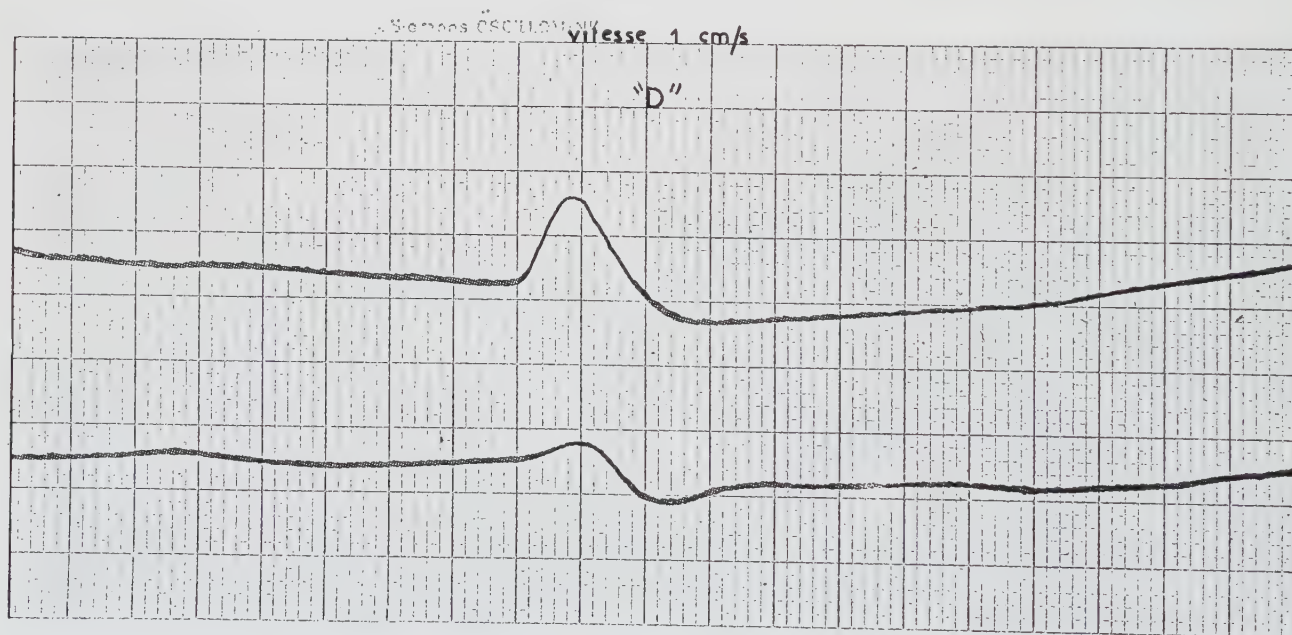
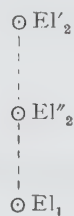


PLANCHE 13.

Test γ : Tensions filtrées à partir de deux chaînes d'enregistrement identiques. « D » est un enregistrement brut directement capté par les chaînes de mesure. f_g = fréquence centrale du système de filtration. Dispositif : deux lignes telluriques colinéaires : longueur de $El'_2 El_1 = 2$ longueurs de $El_1 El''_2$.



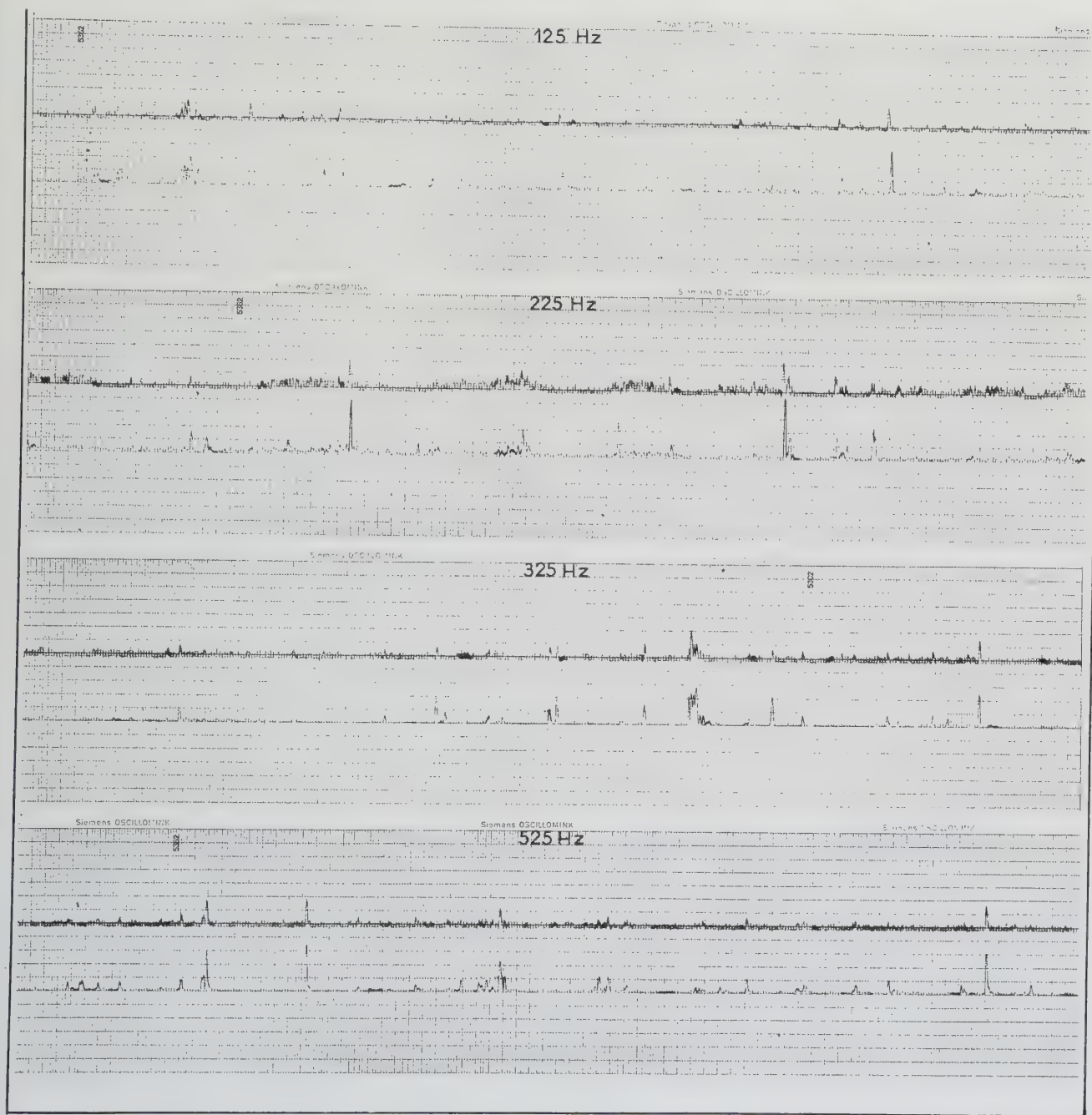


PLANCHE 14.

Test « γ ». Vitesse : 0,5 cm/s. f_0 en Hz.

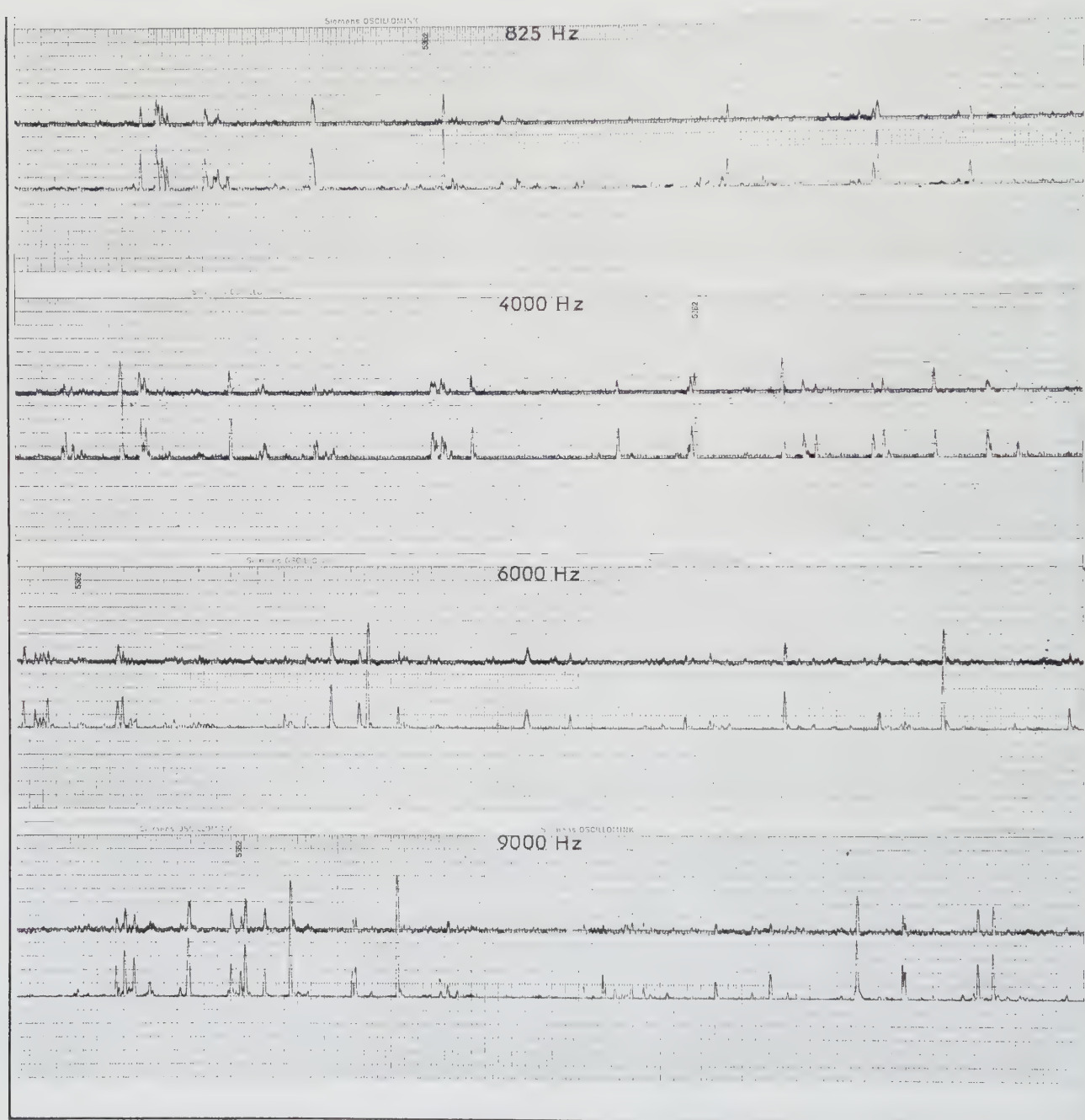


PLANCHE 15.

Test « γ ». Vitesse : 0,5 cm/s. f_0 en Hz.

CHAPITRE II

ESSAI D'INTERPRÉTATION DES DONNÉES PHYSIQUES

Le contenu de ce chapitre est essentiellement consacré à bâtir une hypothèse de distribution résistivités-profondeurs la plus simple possible, permettant d'expliquer le mieux possible les phénomènes physiques observés et décrits dans le chapitre précédent.

Dans la première partie, nous tenterons donc, en nous appuyant sur les données géologiques particulièrement nombreuses dans la région prospectée, de définir un schéma de terrain qui rende compte de l'allure des courbes de résistivité apparente que nous avons obtenues expérimentalement, ainsi que du processus d'évolution desdites courbes lorsque les points de mesure se déplacent d'une station à l'autre sur le terrain. Nous essaierons également de dégager, par le calcul et toujours en puisant dans la même source d'informations, certaines conséquences découlant directement de l'allure des courbes $R(E)_{ex}$ et $R(H)_{ex}$.

Pour ce faire, nous nous appuierons fondamentalement sur les mesures magnéto-telluriques obtenues dans la partie du spectre correspondant aux variations lentes ($5\text{ s} < T < 400\text{ s}$).

Au fil de ce travail, l'hypothèse retenue comme la plus satisfaisante ayant été dégagée, nous essaierons d'en tirer les conclusions qui s'imposent sur une possibilité particulièrement remarquable de la méthode magnéto-tellurique : la détection dans certains cas des limites d'extension de gisements pétroliers.

Enfin, nous présenterons plusieurs suggestions concernant la présence des décharges telluriques.

I. Détermination d'une hypothèse de distribution résistivités-profondeurs rendant compte des courbes expérimentales de résistivité apparente relatives à la bande $5\text{ s} < T < 400\text{ s}$.

A. Les données géologiques.

Ainsi que cela a déjà été dit, la région ayant servi de cadre à notre prospection est particulièrement homogène tant géologiquement que structuralement. On peut donc espérer, en partant des mesures directes de résistivité obtenues par carottages électriques dans de très nombreux puits de forage, qu'il doit être possible d'arriver à définir un découpage type de résistivités-profondeurs qui restera pratiquement constant pour expliquer l'ensemble des courbes de résistivité apparente obtenues expérimentalement. En outre comme, bien qu'ayant toutes un air de famille entre elles, ces courbes ne sont pas identiques et se déforment progressivement lorsque les emplacements de sondages magnéto-telluriques s'éloignent topographiquement les uns des autres, nous chercherons dans le découpage annoncé plus haut quels sont les éléments privilégiés dont les variations progressives pourront rendre compte de ces déformations également progressives des courbes de résistivité apparente.

Le choix de ces éléments privilégiés et l'amplitude de leurs variations devront naturellement s'éloigner aussi peu que possible des limites imposées par le bon sens et la géologie.

L'examen des résultats d'une cinquantaine de carottages électriques et leur recoupement nous a montré que l'idée, exprimée plus haut, de dégager un schéma de base constituant une sorte d'invariant géologique où seuls quelques paramètres judicieusement choisis seraient susceptibles de variations était loin d'être absurde.

Voici donc résumé ce schéma sous l'aspect d'une liste de terrains à propos desquels on exprime parfois les deux paramètres résistivité et épaisseur ou bien, un seul. Parfois aussi, on doit se borner à constater un manque total d'information.

Cette énumération correspond aux terrains que l'on rencontre systématiquement dans la région lorsqu'à l'instar du trépan, on part de la surface pour s'enfoncer dans le sol.

1) Les 250 premiers mètres environ sont toujours dépourvus de mesure de résistivité. Ce fait est dû surtout à la présence de tubages au départ du puits de forage.

2) De 250 à 300-400 m apparaît un ensemble marneux calcaire de résistivité $5 \Omega \cdot m$ environ au sein duquel s'insèrent plusieurs couches d'argiles salées extrêmement conductrices, dont l'épaisseur est de l'ordre de 10 à 15 m et peut même parfois atteindre 30 m.

Ce que nous appelons une couche d'argile conductrice est en fait une concentration très dense de fines passées d'argiles de l'ordre de un à plusieurs mètres, mais qui ont tendance à s'accumuler au voisinage l'une de l'autre. La mesure nous montre que la résistivité des terrains à argile salée est très faible et inférieure à $0,5 \Omega \cdot m$.

3) Vient ensuite sur une épaisseur de l'ordre de 400 m un ensemble à peu près compact attribué à l'horizon sénonien et de résistivité égale à $5 \Omega \cdot m$.

4) Puis succède l'étage turonien de résistivité assez faible. C'est un ensemble très constant d'épaisseur $\Delta z = 100$ m et de résistivité $0,5 \Omega \cdot m$.

5) Le Dogger lagunaire apparaît ensuite sous forme de terrain argilo-calcaire d'épaisseur très peu variable $\Delta z = 1450$ m environ et de résistivité $\rho = 4 \Omega \cdot m$.

6) La couche suivante est constituée de sel compact : c'est le Trias salifère. Épaisseur : $\Delta z = 1150$ m. $\rho = 500 \Omega \cdot m$.

7) Sous le sel viennent des terrains faiblement résistants, en général de nature argileuse : c'est le Trias argileux. $\Delta z = 200$ m. $\rho = 2,5 \Omega \cdot m$.

8) Arrive ensuite une série de grès cambro-ordoviciens plus résistants au sommet de laquelle se succèdent des couches également de grès, mais à grande porosité, constituant le réservoir pétrolier qui peut être plus ou moins envahi par l'eau salée de gisement.

Ces grès, pétrolifères ou non, présentent la même résistivité, soit $4 \Omega \cdot m$. Les zones d'eau salée sont très conductrices car nous avons affaire ici à une eau salée saturée à 280 g de sel par litre.

L'épaisseur totale de la série de grès, couches pétrolifères et zone à eau salée comprises, est de l'ordre de 600 m. L'épaisseur totale cumulée des couches remplies d'eau salée est au maximum de l'ordre de 130 m.

Il est très difficile de se faire une idée exacte sur la valeur de la résistivité à attribuer aux couches à eau salée. En effet, et cette remarque vaut pour les couches d'argiles salées rencontrées dans le paragraphe 1, la lecture des mesures de résistivité obtenues par les procédés usuels devient très imprécise sitôt que l'on aborde de faibles valeurs inférieures à $0,5 \Omega \cdot m$. Aussi laissons-nous pour l'instant en suspens cette question de la détermination exacte de la résistivité des couches de résistivité inférieure à $0,5 \Omega \cdot m$, qui sera résolue en fait d'une manière empirique un peu plus loin en se basant sur l'examen des courbes de résistivité apparente.

9) Le tout repose enfin sur un socle très compact auquel nous avons attribué une valeur de résistivité égale à l'infini.

Les éléments qui viennent d'être explicités sont résumés sur la planche 16.

B. Critique des données géologiques et définition du problème à résoudre.

Nous venons d'expliciter les données géologiques de base que nous allons avoir à utiliser pour expliquer les courbes de résistivité apparente.

Dès maintenant, nous pouvons classer ces données en deux catégories :

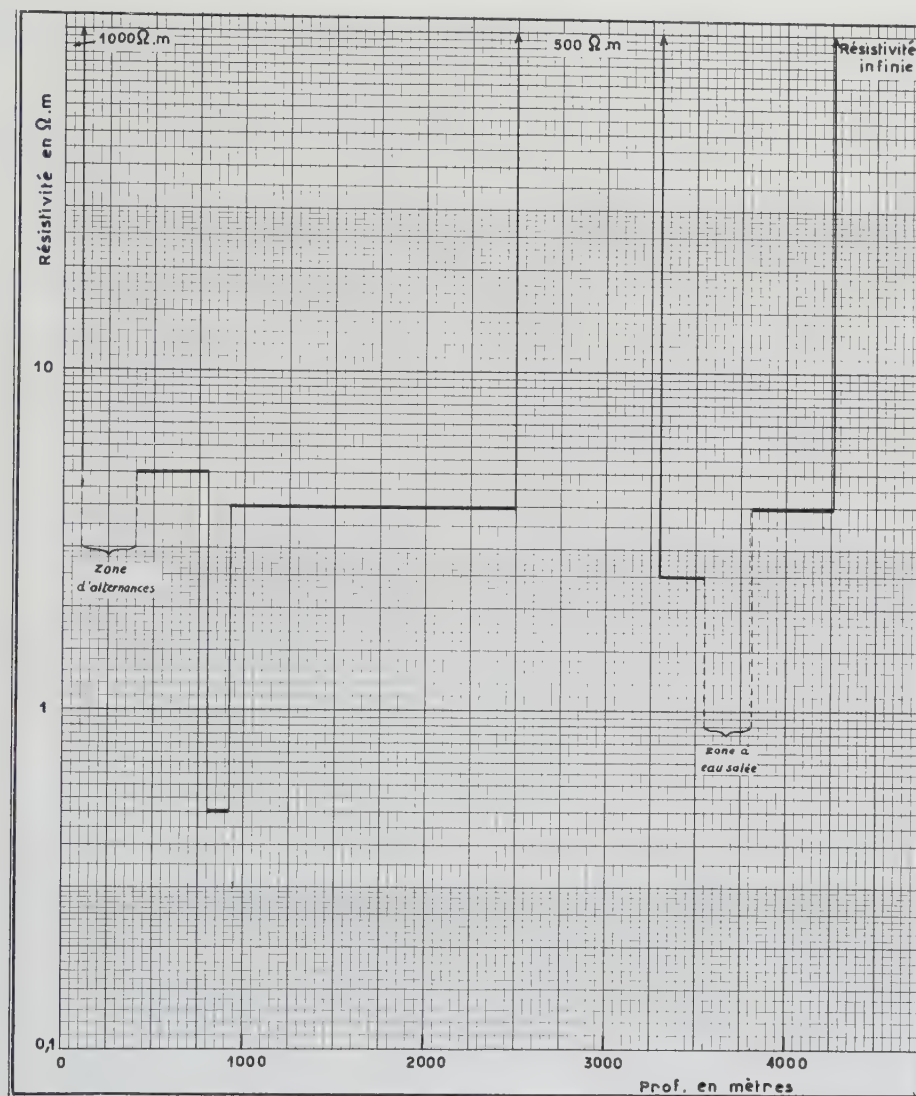


PLANCHE 16.

Distribution type des résistivités-profondeurs dans la région étudiée.

1) celles qui définissent entièrement une couche de terrain en faisant connaître son épaisseur et sa résistivité ;

2) celles concernant des couches pour lesquelles subsistent une ou plusieurs inconnues.

a) Ce sera d'abord le cas de la couche évoquée au premier paragraphe de la liste, qui est constituée par un ensemble de terrains dont on ne sait ni les épaisseurs ni les résistivités.

b) Ce sera également le cas du phénomène d'alternance présenté dans le paragraphe 2. En ce qui concerne la succession de couches à forte résistivité et à faible résistivité, on ne connaît que l'épaisseur totale de la série, la résistivité des terrains à forte résistivité qui est de $5 \Omega \cdot m$ et l'épaisseur moyenne d'une passée d'argile conductrice qui est de l'ordre de 15 à 30 m, et le nombre de pas-

sées conductrices qui est en moyenne de 2, situées vers le toit de la série. L'inconnue majeure qui subsiste est la résistivité des couches conductrices, dont on sait seulement qu'elle est inférieure à $0,5 \Omega \cdot m$.

c) La série du paragraphe 8 présente également un phénomène d'alternance un peu analogue. Cette fois encore, on connaît uniquement la résistivité des couches relativement résistantes, soit $4 \Omega \cdot m$, alors que la résistivité des terrains conducteurs peut seulement être qualitativement évaluée comme très faible. Par contre, on sait que l'épaisseur totale de la série est 600 m et que l'épaisseur cumulée des couches d'eau salée dépasse rarement 130 m.

Considérons maintenant de plus près les courbes de résistivité apparente que nous nous proposons d'expliquer à partir des données qui viennent d'être décrites.

Nous allons d'abord nous attacher à décrire la morphologie d'une courbe de résistivité apparente prise au hasard parmi les deux cents que nous avons eu à tracer. On peut la voir représentée sur la planche 17, sous l'appellation « C ».

La courbe C peut se décomposer d'une manière évidente et simple en trois parties :

- 1) une partie rectiligne P_1 de pente à peu près constante et inférieure à 2 ;
- 2) une partie J de forme courbée et présentant un point d'inflexion ;
- 3) une troisième partie P_2 de pente généralement constante et égale à 2.

Nous dirons maintenant qu'une courbe appartient à un type donné selon la position, dans le mode de report graphique que nous utilisons, de la partie P_1 .

Si maintenant nous essayons de classer nos deux cents courbes expérimentales de résistivité apparente, nous constatons qu'elles se situent toutes entre deux types-limite définis comme type A et type B (planche 18), chaque type donnant naissance à une famille de courbes définie par la plus ou moins grande amplitude de la partie J.

C'est ainsi que dans le type A, par exemple, on voit varier la partie J dans les limites comprises entre la courbe A_1 et la courbe A_2 . De même en ce qui concerne le type B auquel correspondent les courbes-limite B_1 et B_2 .

Il est bien entendu que ce phénomène de génération d'une famille de courbes à partir d'un type donné intervient quel que soit le type rencontré. Toutefois, pour fixer un ordre de grandeur, nous signalons qu'aucune des courbes de résistivité apparente ainsi rencontrées n'a jusqu'ici présenté de partie J plus prononcée que celle relevée sur la courbe A_2 .

Si nous imaginons un instant que nous ne possédons aucune donnée géologique, la seule description qualitative des courbes de résistivité apparente peut déjà néanmoins nous permettre de tirer un certain nombre de conclusions qui vont orienter notre analyse.

1) Le fait que toutes les courbes de résistivité apparente présentent des formes analogues qui évoluent d'une manière continue entre deux types-limite nous donne à penser que nous nous trouvons, dans la région considérée, en présence de terrains dont la distribution résistivités-profondeurs ne peut varier n'importe comment. La notion d'une continuité géologique s'impose donc à nous, mais cette notion peut même être précisée.

2) En effet, les variations dans la position de P_1 ne peuvent être attribuées qu'à des variations de paramètre concernant des terrains conducteurs situés à des niveaux relativement près de la surface.

3) Les variations de l'amplitude de J ne pourront, pour leur part, être dues qu'à des variations de paramètres concernant des terrains conducteurs situés à des niveaux relativement profonds.

4) Ces deux types de variations mis à part, l'analogie dans les formes de courbes rencontrées tend également à nous faire penser que les autres couches géologiques en présence doivent être caractérisées par des paramètres à peu près constants lorsque l'on passe d'un point de mesure à l'autre. Or, si maintenant le lecteur se reporte à l'énoncé des données géologiques, il constatera précisément que les couches des paragraphes 1 et 2 sont d'une part mal définies et d'autre part comportent des couches d'argiles très conductrices. Le lecteur constatera en outre que la couche du paragraphe 8

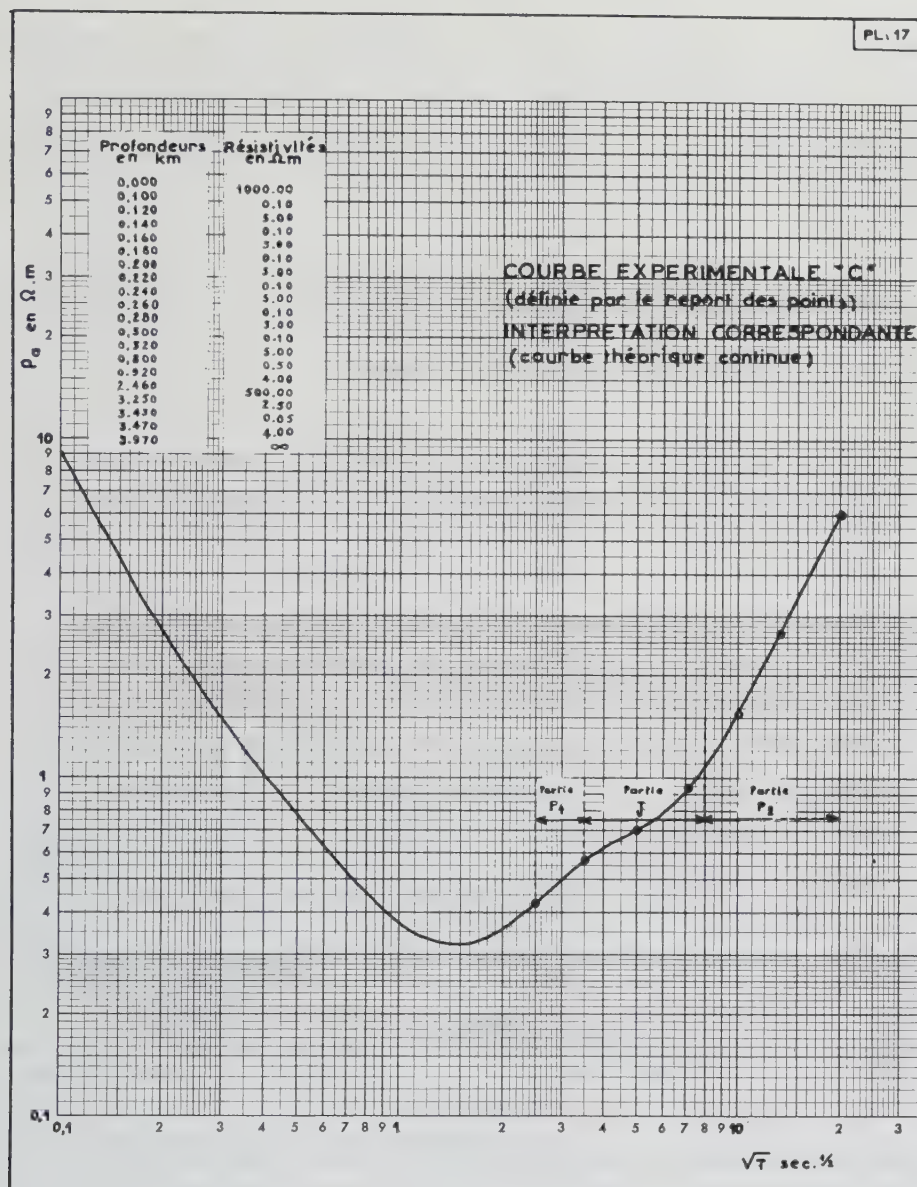


PLANCHE 17.

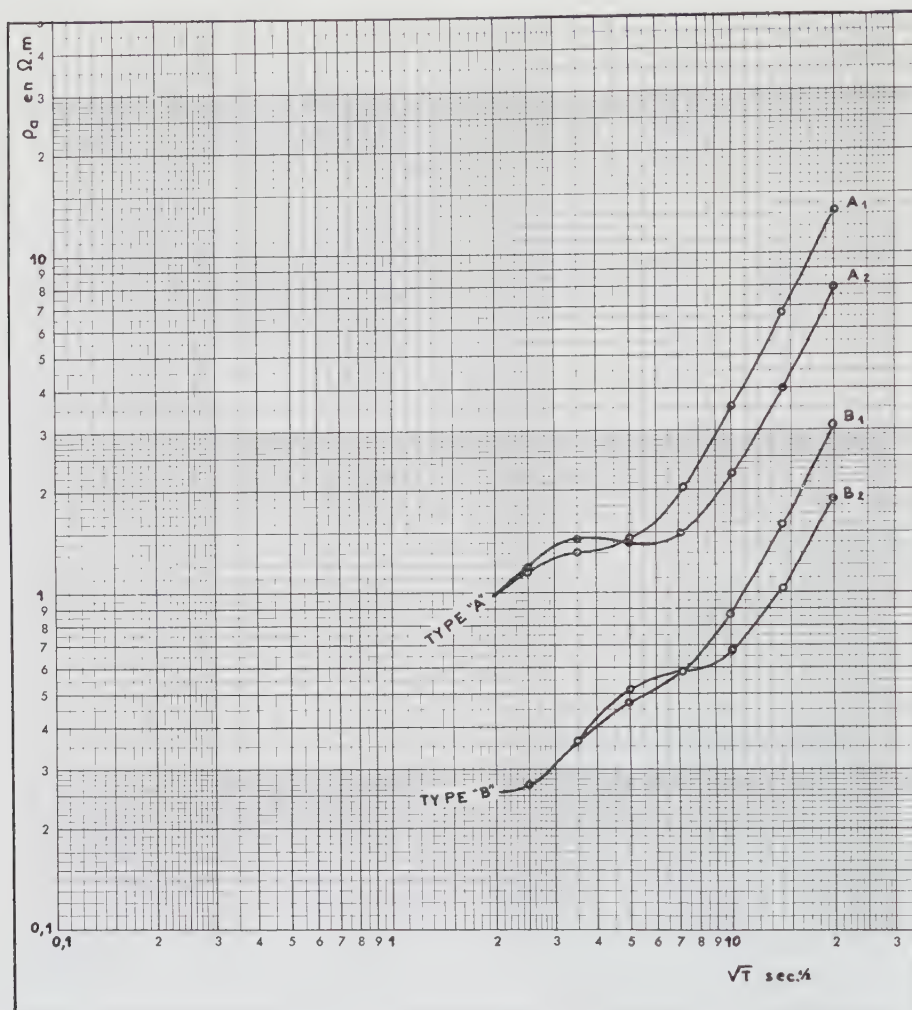


PLANCHE 18.

Deux types caractéristiques de sondages magnéto-telluriques obtenus dans la région étudiée.

PLANCHE 18 bis.

INTERPRÉTATION RÉSISTIVITÉS-PROFONDEURS.

PROFONDEURS (km)		RÉSISTIVITÉS ($\Omega \cdot m$)	PROFONDEURS (km)		RÉSISTIVITÉS ($\Omega \cdot m$)
A ₁	A ₂		B ₁	B ₂	
0	0	1 000	0	0	1 000
0,100	0,100	0,1	0,100	0,100	0,1
0,107	0,107	5	0,132	0,132	5
0,114	0,114	0,1	0,164	0,164	0,1
0,121	0,121	5	0,196	0,196	5
0,128	0,128	0,1	0,228	0,228	0,1
0,135	0,135	5	0,260	0,260	5
0,142	0,142	0,1	0,292	0,292	0,1
0,149	0,149	5	0,324	0,324	5
0,156	0,156	0,1	0,356	0,356	0,1
0,163	0,163	5	0,388	0,388	5
0,170	0,170	0,1	0,420	0,420	0,1
0,177	0,177	5	0,452	0,452	5
0,660	0,660	0,5	0,930	0,930	0,5
0,780	0,780	4	1,05	1,05	4
2,33	2,33	500	2,60	2,60	500
3,11	3,11	2,5	3,38	3,38	2,5
3,30	3,30	0,05	3,57	3,57	0,05
3,33	3,36	4	3,63	3,69	4
3,83	3,86	∞	4,13	4,19	∞

comporte l'eau salée de gisement très conductrice et d'épaisseur variable, et que l'ensemble des autres horizons géologiques reste bel et bien constant dans toute la région.

On ne pouvait désirer meilleur recoupement, et la manière dont nous allons préparer notre travail d'explication des courbes de résistivité apparente se dessine donc d'elle-même :

1) C'est en jouant sur les terrains des paragraphes 1 et 2 que nous déterminerons pour un cas donné la position de la partie P₁ de la courbe ;

2) C'est en jouant sur la couche d'eau salée de gisement que nous déterminerons l'amplitude de la partie J ;

3) L'ensemble des autres couches restera constant en épaisseur et résistivité à travers toutes ces manipulations.

Bien entendu, nous essaierons ensuite de voir les différents inconvénients possibles de cette hypothèse de départ et d'en faire ultérieurement la critique.

II. Le processus de calcul utilisé.

Supposons maintenant, pour les différents cas à traiter, que tous les paramètres géologiques définissant le découpage résistivités-profondeurs soient parfaitement précisés, et examinons le processus de calcul qui va nous donner accès à la courbe de résistivité apparente théorique relative à chaque cas.

Pour résoudre cette question, nous nous sommes essentiellement appuyé sur deux publications de L. CAGNIARD (2).

On suppose au départ que le terrain dont nous voulons calculer la résistivité apparente est cons-

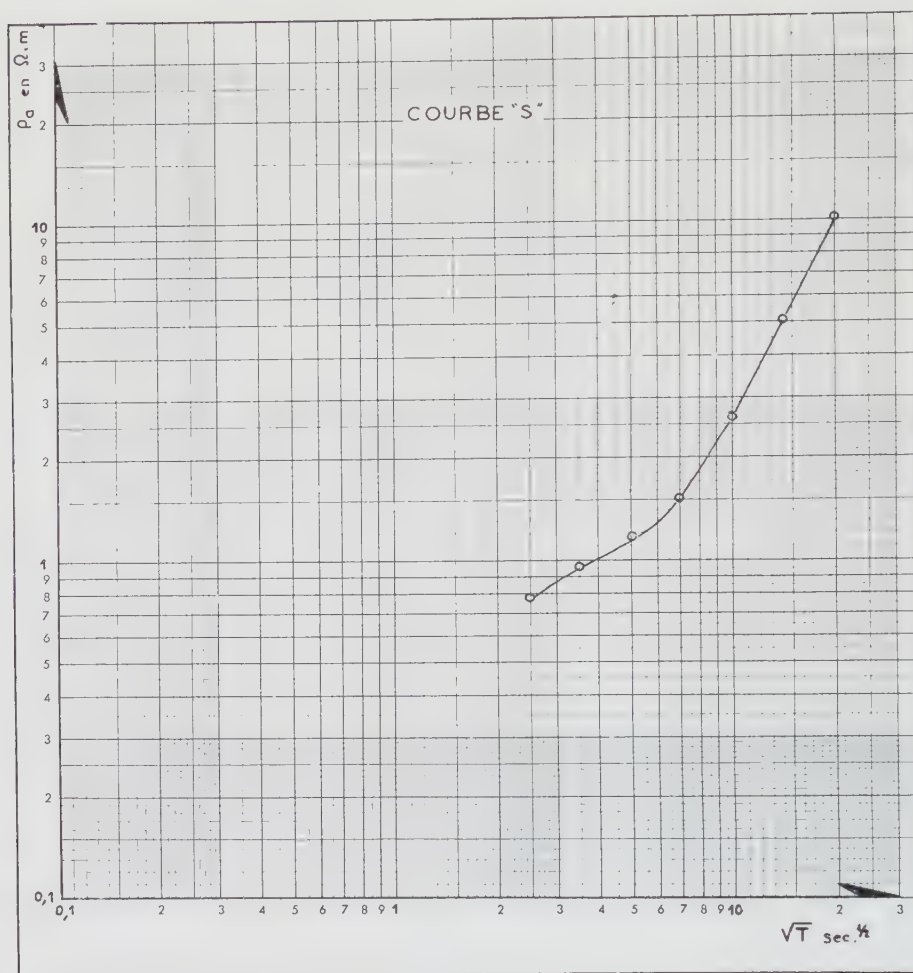


PLANCHE 19.

Résistivité apparente obtenue à partir des niveaux statistiques des champs électriques et magnétiques tels qu'ils sont représentés sur la planche 6.

PLANCHE 19 bis.

INTERPRÉTATION RÉSISTIVITÉS-PROFONDEURS.
COURBE « S ».

PROFONDEURS (km)	RÉSISTIVITÉS ($\Omega \cdot m$)
0	1 000
0,100	0,1
0,111	5
0,122	0,1
0,133	5
0,144	0,1
0,155	5
0,166	0,1
0,177	5
0,188	0,1
0,199	5
0,210	0,1
0,221	5
0,700	0,5
0,820	4
2,37	500
3,15	2,5
3,34	0,05
3,37	4
3,87	∞

titué de n couches horizontales, homogènes et isotropes, de résistivités respectivement égales à $\rho_1 = \frac{1}{\sigma_1}$, $\rho_2 = \frac{1}{\sigma_2}$, ..., $\rho_n = \frac{1}{\sigma_n}$. La dernière couche repose sur un socle d'épaisseur infinie et de résistivité également infinie (planche 20).

On suppose enfin que chaque couche est le siège de nappes telluriques uniformes et harmoniques de période T .

Définissons maintenant un trièdre direct de coordonnées rectangulaires OXYZ tel que l'origine O soit sur la surface du sol et que OZ soit la verticale descendante. L'angle OX, OY est égal à $-\frac{\pi}{2}$. Supposons que les nappes telluriques harmoniques uniformes s'écoulent suivant OX (planche 20).

Étant donné une couche de résistivité $\rho = \frac{1}{\sigma}$ et de perméabilité μ , en un point quelconque de la couche le comportement d'un courant variable est régi par les équations de Maxwell :

$$\begin{aligned} -\mu \dot{h} &= \text{rot } e \\ 4\pi\sigma e + \frac{\dot{e}}{\mu\Omega^2} &= \text{rot } h \\ \text{div } e &= \text{div } h = 0 \end{aligned} \quad [I]$$

Le point placé sur h ou e désigne la dérivée par rapport au temps du champ électrique ou du champ magnétique. $\sigma = \frac{1}{\rho}$ est la conductibilité. « c » étant la vitesse de la lumière dans le vide,

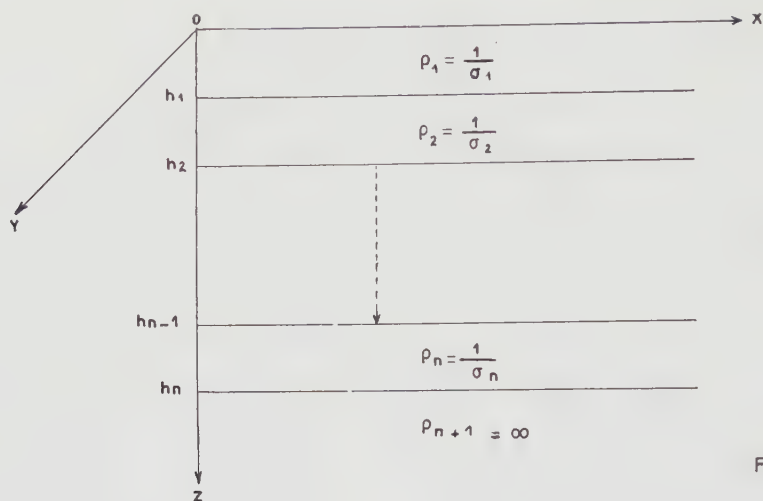


Fig. 1

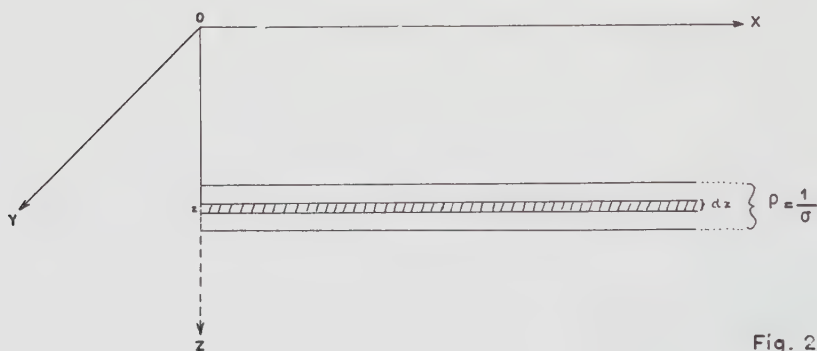


Fig. 2

PLANCHE 20.

$\Omega = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$ est la vitesse de phase des ondes électromagnétiques planes qui peuvent se propager dans le milieu considéré. ε et μ sont respectivement la constante diélectrique et la perméabilité du milieu par rapport au vide. A l'exception de ε et μ , toutes les grandeurs qui figurent dans [I] sont exprimées en unités électromagnétiques.

On sait que la constante μ , sauf dans le cas bien particulier de la magnétite, peut être considérée comme pratiquement égale à 1.

Cette simplification étant faite, il devient extrêmement avantageux, plutôt que d'intégrer directement les équations de Maxwell, d'opérer, ainsi que cela est indiqué dans les ouvrages classiques traitant de la question (3), le changement de variable suivant :

$$\begin{aligned}
 h &= \text{rot} \left(4 \pi \sigma \dot{p} + \frac{\dot{p}}{\Omega^2} \right) \\
 e &= \text{grad div } \dot{p} - \Delta \dot{p} = \text{rot rot } \dot{p}
 \end{aligned}
 \quad [2]$$

Ces relations définissent le vecteur de Hertz désigné par « $\dot{p}$ ».

Il en ressort que :

$$\Delta p - 4 \pi \sigma \dot{p} - \frac{\ddot{p}}{\Omega^2} = 0 \quad [3]$$

Pour faire la théorie particulière au cas d'un régime harmonique permanent et stationnaire de période T , de pulsation $\omega = 2 \pi / T$, nous emploierons la notation imaginaire :

$$h = H e^{-i \omega t} \quad e = E e^{-i \omega t} \quad p = P e^{-i \omega t}$$

où les vecteurs H , E , P ne dépendent plus du temps t , mais uniquement des variables d'espace x , y , z . La relation [3] devient alors :

$$\Delta P + i \omega \left(4 \pi \sigma - \frac{i \omega}{\Omega^2} \right) P = 0 \quad [4]$$

Pour le géophysicien pratiquant la magnéto-tellurique, cette relation peut se simplifier. En effet, lorsque le conducteur auquel on a affaire se présente sous l'aspect d'un terrain formé de couches géologiques quelconques, à la surface duquel on mesure les variations électromagnétiques dont le spectre se situe dans la bande $5 \text{ s} < T < 400 \text{ s}$, le terme $4 \pi \sigma$ est toujours colossal par rapport à ω / Ω^2 qui peut alors être négligé.

En effet, comme il a déjà été dit $\Omega = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}}$. Or la valeur de μ étant égale à 1, on sait d'autre part que la valeur maximale obtenue pour ϵ est de 80 dans le cas de l'eau. Toutefois, même si une certaine école de géophysiciens a cru, pour interpréter les phénomènes de polarisation provoquée, pouvoir conclure que tout se passait parfois comme si la valeur de la constante diélectrique devenait plus importante, il n'en demeure pas moins que ϵ devrait prendre des valeurs absurdement élevées pour que le terme ω / Ω^2 doive être maintenu à côté du terme $4 \pi \sigma$. Prenons le cas extrême d'un terrain où $\rho = 10^3 \Omega \cdot \text{m}$.

En unités pratiques (définies dans le chapitre 1) le produit

$$4 \pi \sigma = 4 \pi \cdot 10^{-4} = 1,25 \cdot 10^{-3}$$

tandis que pour :

$$T = 1 \text{ s} = \frac{\omega}{\Omega^2} = \frac{2 \pi}{c^2} \epsilon \mu$$

d'où :

$$\frac{\omega}{\Omega^2} = \frac{2 \pi \epsilon}{9 \cdot 10^{11}} = 6,98 \cdot 10^{-11} \cdot \epsilon$$

Il faudrait donc que ϵ devînt égal à $1,8 \cdot 10^7$ pour que ω / Ω^2 soit égal à $4 \pi \sigma$ lorsque $T = 1 \text{ s}$. On voit donc qu'il est tout à fait légitime d'écrire la relation [4] sous la forme :

$$\Delta P + 4 \pi \sigma \omega i P = 0 \quad [5]$$

Notons au passage que cette expression serait la même si nous avions d'emblée affecté la vitesse c d'une valeur infinie. Autrement dit, le formalisme mathématique que représente l'équation différentielle [5] substitue implicitement au phénomène réel de propagation un phénomène de régime stationnaire.

Considérons maintenant plus particulièrement la nappe tellurique harmonique et uniforme d'épaisseur dz , située à la profondeur z et qui s'écoule suivant la direction OX . Il en résulte que les

composantes E_y et E_z du champ électrique suivant Y et Z sont nulles. De même pour H_x et H_z , composantes du champ magnétique. Par conséquent, les composantes P_y et P_z du vecteur de Hertz sont nulles.

La relation [5] peut alors s'écrire :

$$\Delta P_x + 4\pi\sigma\omega i P_x = 0 \quad [6]$$

Autrement dit, en se reportant à la définition du vecteur de Hertz :

$$\begin{aligned} H_y &= 4\pi\sigma \operatorname{rot} P_x \\ E_x &= \operatorname{grad} \operatorname{div} P_x - \Delta P_x = \operatorname{rot} \operatorname{rot} P_x \end{aligned}$$

d'où :

$$H_y = 4\pi\sigma \frac{\partial P_x}{\partial z}$$

avec : $H_x = 0$; $H_z = 0$;

$$E_x = -\frac{\partial^2 P_x}{\partial z^2}$$

avec : $E_y = 0$; $E_z = 0$.

E_x devient donc égal à $-\Delta P_x$, d'où d'après la relation [6] :

$$E_x = 4\pi\sigma\omega i P_x$$

Comme E_x est alors proportionnel à P_x , on peut écrire :

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} + 4\pi\sigma\omega i E_x = 0 \quad [7]$$

avec :

$$H_y = -\frac{i}{\omega} \frac{\partial E_x}{\partial z}$$

L'intégrale générale de l'équation [7] sera de la forme :

$$E_x = A e^{a\sqrt{\sigma}z} + B e^{-a\sqrt{\sigma}z} \quad [8]$$

avec :

$$a = 2\pi \sqrt{\frac{2}{T}} \cdot e^{-i\frac{\pi}{4}} = 2 \frac{\pi}{\sqrt{T}} (1-i)$$

A et B étant des constantes complexes.

L'expression correspondante du champ magnétique devient alors en vertu de [7] :

$$H_y = -\frac{ia\sqrt{\sigma}}{\omega} \left[+A e^{a\sqrt{\sigma}z} - B e^{-a\sqrt{\sigma}z} \right]$$

ou encore :

$$H_y = e^{i\frac{\pi}{4}} \sqrt{2\sigma T} \left[-A e^{a\sqrt{\sigma}z} + B e^{-a\sqrt{\sigma}z} \right] \quad [9]$$

Autrement dit, si nous revenons maintenant à notre distribution résistivités-profondeurs explicitée initialement, dans la première couche, les champs s'exprimeront en fonction de la profondeur, cette fois en unités pratiques telles que nous les avons déjà définies à l'usage du prospecteur.

$$E_x = A_1 e^{a \sqrt{\frac{\sigma_1}{10}} z} + B_1 e^{-a \sqrt{\frac{\sigma_1}{10}} z}$$

$$H_y = e^{i \frac{\pi}{4}} \sqrt{\frac{2 \sigma_1 T}{10}} \left[-A_1 e^{a \sqrt{\frac{\sigma_1}{10}} z} + B_1 e^{-a \sqrt{\frac{\sigma_1}{10}} z} \right] \quad [10]$$

De même, dans la deuxième couche :

$$E_x = A_2 e^{a \sqrt{\frac{\sigma_2}{10}} z} + B_2 e^{-a \sqrt{\frac{\sigma_2}{10}} z}$$

$$H_y = e^{i \frac{\pi}{4}} \sqrt{\frac{2 \sigma_2 T}{10}} \left[-A_2 e^{a \sqrt{\frac{\sigma_2}{10}} z} + B_2 e^{-a \sqrt{\frac{\sigma_2}{10}} z} \right]$$

et ainsi de suite.

En écrivant la continuité de ces champs pour les profondeurs $h_1, h_2, \dots, h_n$, où se situent les discontinuités de résistivités, on pourra écrire le système :

pour les champs électriques :

$$A_1 e^{a \sqrt{\frac{\sigma_1}{10}} h_1} + B_1 e^{-a \sqrt{\frac{\sigma_1}{10}} h_1} = A_2 e^{a \sqrt{\frac{\sigma_2}{10}} h_1} + B_2 e^{-a \sqrt{\frac{\sigma_2}{10}} h_1}$$

$$A_2 e^{a \sqrt{\frac{\sigma_2}{10}} h_2} + B_2 e^{-a \sqrt{\frac{\sigma_2}{10}} h_2} = A_3 e^{a \sqrt{\frac{\sigma_3}{10}} h_2} + B_3 e^{-a \sqrt{\frac{\sigma_3}{10}} h_2}$$

$$\vdots$$

$$A_n e^{a \sqrt{\frac{\sigma_n}{10}} h_n} + B_n e^{-a \sqrt{\frac{\sigma_n}{10}} h_n} = B_{n+1} e^{a \sqrt{\frac{\sigma_{n+1}}{10}} h_n}$$

pour les champs magnétiques :

$$\sqrt{\sigma_1} \left[-A_1 e^{a \sqrt{\frac{\sigma_1}{10}} h_1} + B_1 e^{-a \sqrt{\frac{\sigma_1}{10}} h_1} \right] = \sqrt{\sigma_2} \left[-A_2 e^{a \sqrt{\frac{\sigma_2}{10}} h_1} + B_2 e^{-a \sqrt{\frac{\sigma_2}{10}} h_1} \right]$$

$$\sqrt{\sigma_2} \left[-A_2 e^{a \sqrt{\frac{\sigma_2}{10}} h_2} + B_2 e^{-a \sqrt{\frac{\sigma_2}{10}} h_2} \right] = \sqrt{\sigma_3} \left[-A_3 e^{a \sqrt{\frac{\sigma_3}{10}} h_2} + B_3 e^{-a \sqrt{\frac{\sigma_3}{10}} h_2} \right]$$

$$\vdots$$

$$\sqrt{\sigma_n} \left[-A_n e^{a \sqrt{\frac{\sigma_n}{10}} h_n} + B_n e^{-a \sqrt{\frac{\sigma_n}{10}} h_n} \right] = \sqrt{\sigma_{n+1}} \left[B_{n+1} e^{a \sqrt{\frac{\sigma_{n+1}}{10}} h_n} \right]$$

1) Les termes A_{n+1} sont nuls puisque le milieu socle est considéré comme d'épaisseur infinie par rapport à l'épaisseur totale des terrains sédimentaires. Les champs électrique et magnétique dans le socle ne sauraient devenir infinis en même temps que z , aussi leurs expressions se réduisent aux termes affectés d'exponentielles négatives.

2) D'autre part, si l'on pose $\rho_{n+1} = \infty$, d'où $\sigma_{n+1} = 0$, les termes $e^{-a \sqrt{\frac{\sigma_{n+1}}{10}} h_n}$ sont égaux à 1.

3) Si l'on considère maintenant une période T isolée dans le spectre, dans la mesure où le but recherché est de calculer à la surface du terrain considéré le rapport E/H théorique, on peut toujours attribuer une valeur arbitraire quelconque à l'une des $2n+1$ constantes A et B . On pourra toujours alors décréter que $B_{n+1} = 1$, ce qui introduit des simplifications de calcul appréciables. En effet, dans le cas actuel, on pourra alors écrire :

$$A_n = \frac{1}{2} e^{-a \sqrt{\frac{\sigma_n}{10}} h_n}$$

$$B_n = \frac{1}{2} e^{+a \sqrt{\frac{\sigma_n}{10}} h_n}$$

et :

$$B_{n-1} = \frac{1}{2} \left[\frac{\sqrt{\sigma_{n-1}} - \sqrt{\sigma_n}}{\sqrt{\sigma_{n-1}}} \cdot e^{ah_{n-1} \left(\sqrt{\frac{\sigma_{n-1}}{10}} + \sqrt{\frac{\sigma_n}{10}} \right)} \cdot A_n + \frac{\sqrt{\sigma_{n-1}} + \sqrt{\sigma_n}}{\sqrt{\sigma_{n-1}}} \cdot e^{-ah_{n-1} \left(-\sqrt{\frac{\sigma_{n-1}}{10}} + \sqrt{\frac{\sigma_n}{10}} \right)} \cdot B_n \right] \quad [II]$$

$$A_{n-1} = \frac{1}{2} \left[\frac{\sqrt{\sigma_{n-1}} + \sqrt{\sigma_n}}{\sqrt{\sigma_{n-1}}} \cdot e^{ah_{n-1} \left(-\sqrt{\frac{\sigma_{n-1}}{10}} + \sqrt{\frac{\sigma_n}{10}} \right)} \cdot A_n + \frac{\sqrt{\sigma_{n-1}} - \sqrt{\sigma_n}}{\sqrt{\sigma_{n-1}}} \cdot e^{-ah_{n-1} \left(\sqrt{\frac{\sigma_{n-1}}{10}} + \sqrt{\frac{\sigma_n}{10}} \right)} \cdot B_n \right]$$

Il sera alors toujours possible, en procédant de proche en proche et en appliquant autant de fois que nécessaire la relation [II], de calculer tous les $2n$ termes en A et B .

Le champ électrique E_x en surface devient alors :

$$E_{x1} = A_1 + B_1$$

De même le champ magnétique :

$$H_{y1} = e^{i \frac{\pi}{4}} \sqrt{\frac{2 \sigma_1 T}{10}} (-A_1 + B_1)$$

Autrement dit, le rapport E/H tel que nous l'avons déjà défini n'est autre que l'expression :

$$\frac{\text{Mod } E_{x1}}{\text{Mod } H_{y1}}$$

et la résistivité apparente : $\rho_a = \frac{1}{\sigma_a}$ s'exprimera sous la forme :

$$\rho_a = \rho_1 \left[\frac{\text{Mod } (A_1 + B_1)}{\text{Mod } (-A_1 + B_1)} \right]^2$$

Notons au passage, bien que cela ne nous serve pas dans la pratique à cause de difficultés expérimentales, que le décalage de phase pour la période T considérée de H_{y1} par rapport à E_{x1} s'exprime par :

$$\Theta = \frac{\pi}{4} + \Phi - \Psi$$

en posant :

$$E_{x1} = \text{Mod} (A_1 + B_1) e^{-i(\Phi)}$$

$$H_{y1} = \frac{2\sigma_1 T}{10} \text{Mod} (-A_1 + B_1) e^{i\left[\frac{\pi}{4} - \Psi\right]}$$

Nous venons donc de préciser le processus de calcul de la résistivité apparente théorique d'un terrain dont on a défini la distribution résistivités-profondeurs. L'interprétation d'un sondage magnéto-tellurique aura donc pour base de départ essentielle la comparaison systématique de la fonction calculée et de la courbe expérimentale de résistivité apparente.

Voyons maintenant, en nous appuyant sur les développements théoriques qui précèdent, quelles conclusions peuvent être tirées de l'examen des courbes expérimentales $R(E)_{\text{ex}}$ et $R(H)_{\text{ex}}$.

Rappelons tout d'abord que nous avons supposé que les séries de valeurs qui constituaient les deux courbes en question reflétaient pour $5 \text{ s} < T < 400 \text{ s}$, l'évolution relative en fonction de T des amplitudes des champs électrique et magnétique mesurées à la surface du sol, si l'excitation donnant lieu aux variations magnéto-telluriques dans la région considérée était restée immuable et de forme harmonique durant l'année consacrée aux mesures.

D'autre part, le lecteur n'a pas oublié que la série des valeurs statistiques $E_{(T)e}$ et $H_{(T)e}$, exprimées en fonction de T , nous avait permis de calculer une courbe de résistivité apparente « S » qui, compte tenu du système de report graphique utilisé, se plaçait fort bien entre les courbes-limites du type A et celles du type B (planche 19). Il est alors facile, en utilisant l'hypothèse d'interprétation que nous avons mise en œuvre pour expliquer les deux cents courbes de résistivité apparente obtenues par des mesures normales, de déterminer une distribution résistivités-profondeurs qui rende parfaitement compte du tracé de la courbe « S » (planche 19 bis).

Dans le cadre de cette interprétation, il est alors possible en particulier de comparer respectivement, pour une période T donnée, les valeurs calculées du champ électrique et du champ magnétique aux valeurs expérimentales $E_{(T)e}$ et $H_{(T)e}$.

Or, ainsi qu'on l'a déjà vu, les expressions des champs à la surface du sol sont les suivantes :

$$E_{x1} = A_1 + B_1$$

$$H_{y1} = e^{i\frac{\pi}{4}} \sqrt{\frac{2\sigma_1 T}{10}} (-A_1 + B_1)$$

Toutefois, il faut alors remarquer que les champs ne sont ainsi exprimés qu'à un facteur constant près qu'il est totalement inutile de connaître quand on désire uniquement obtenir la valeur du rapport E/H .

En effet, on se rappelle que, devant les systèmes généraux d'équations de la page 1137, nous avons constaté que le rapport E/H obtenu pour une période T quelconque ne serait pas modifié si l'on effectuait la simplification $B_{n+1} = 1$, ce qui revenait à poser que le module des champs électriques transmis dans le substratum était égal à 1.

En conséquence, pour réaliser la comparaison annoncée plus haut, il nous faudra poser :

$$E_{(T)c} = (B_{n+1})_T \cdot \text{Mod} (A_1 + B_1)_T$$

$$H_{(T)c} = (B_{n+1})_T \cdot \sqrt{\frac{2 \sigma_1 T}{10}} \text{Mod} (A_1 + B_1)_T$$

Plutôt que d'obtenir ainsi directement la série des valeurs prises par $(B_{n+1})_T$, il est possible de présenter la chose sous une autre forme.

En effet, par analogie avec les résultats expérimentaux $R(E)_{\text{ex}}$ et $R(H)_{\text{ex}}$, on peut alors définir les fonctions :

$$R(E)_c = \frac{(B_{n+1})_T \cdot \text{Mod} (A_1 + B_1)_T}{(B_{n+1})_{T_0} \cdot \text{Mod} (A_1 + B_1)_{T_0}}$$

et :

$$R(H)_c = \frac{(B_{n+1})_T}{(B_{n+1})_{T_0}} \frac{\text{Mod} (-A_1 + B_1)_T}{\text{Mod} (-A_1 + B_1)_{T_0}} \cdot \frac{\sqrt{T}}{\sqrt{T_0}}$$

avec $T_0 = 400$ s.

Il est alors facile d'obtenir en fonction de T , la valeur du rapport $\frac{(B_{n+1})_T}{(B_{n+1})_{T_0}} = R(E)_s$ en identifiant $R(E)_c$ avec $R(E)_{\text{ex}}$ ou $R(H)_c$ avec $R(H)_{\text{ex}}$.

$R(E)_s$ représente alors, dans les conditions d'éclairement définies à propos de l'obtention de $E_{(T)c}$ et de $H_{(T)c}$, l'évolution relative en fonction de T du champ électrique transmis dans le socle de résistivité infinie, en prenant comme unité la valeur de champ correspondant à $T_0 = 400$ s.

L'expression correspondante $R(H)_s$, concernant les champs magnétiques également transmis dans le socle, n'est autre que :

$$R(H)_s = \frac{(B_{n+1})_T}{(B_{n+1})_{T_0}} \cdot \frac{\sqrt{T}}{\sqrt{T_0}}$$

Les différents processus de calcul que nous allons avoir à utiliser étant déterminés, voyons maintenant leur application aux données géologiques définies dans la première partie de ce chapitre.

III. Conclusions interprétatives.

A. Confrontation des résultats théoriques et expérimentaux concernant les courbes de résistivité apparente.

Partant de l'hypothèse de distribution résistivités-profondeurs définie en I et en utilisant le processus de calcul déterminé en II, nous allons obtenir un certain nombre de résultats théoriques que nous confronterons avec les résultats expérimentaux.

Après avoir définitivement mis au point une hypothèse explicative unique, nous montrerons comment les courbes de résistivité apparente théoriques peuvent être rendues superposables à leurs homologues expérimentales.

Nous renvoyons maintenant le lecteur à la définition du problème à résoudre telle qu'elle était explicitée à la fin de la première partie de ce chapitre.

La détermination des courbes théoriques de résistivité apparente s'est déroulée essentiellement en deux temps :

a) Calage de la partie P_1 des courbes théoriques sur la partie P_1 des courbes expérimentales.

Ainsi que cela était annoncé, c'est en jouant sur les terrains des paragraphes 1 et 2 que nous

avons pu satisfaire à cette première condition. En ce qui concernait les couches correspondant au paragraphe 1, le seul élément dont nous disposions était la certitude que la résistivité à attribuer au premier terrain rencontré en partant de la surface devait être très forte. Cette certitude découlait d'une part du fait que ledit terrain est constitué surtout de sables secs sur une épaisseur assez importante, et d'autre part du fait que les résultats de mesures de résistance de prise de terre sans aménagement préalable des électrodes donnaient des valeurs énormes de l'ordre de 10^5 à $5 \cdot 10^4 \Omega$.

Nous avons alors posé sans trop d'hésitation $\rho_1 = 10^3 \Omega \cdot m$. Nous avons ensuite attribué à ces terrains de surface très résistants une épaisseur constante, ce qui semblait assez logique dans une région où la topographie varie très peu. Cette épaisseur, nous l'avons fixée arbitrairement à 100 m.

Si maintenant l'on revient à l'énoncé de la série de couches du paragraphe 2, on y voit la présence de bancs d'argiles très conductrices dans une masse compacte de terrain à résistivité égale à $5 \Omega \cdot m$, et ce entre les cotes de 250 à 300-400 m de profondeur. Compte tenu de la position relativement basse de la partie P_1 pour l'ensemble de nos courbes, y compris celles du type A, il était légitime que dans tous les cas les passées d'argiles rencontrées à ce niveau soient également encore présentes entre la base des sables secs et la profondeur définie par la cote — 250 m.

On s'est alors appuyé sur la courbe « C » qui provient de mesures effectuées aux abords d'un forage dont on sait que la base de la dernière passée d'argile conductrice a été rencontrée à — 300 m, l'épaisseur de ladite passée étant de 20 m environ. En remontant alors vers la surface, après avoir traversé 20 m de terrain à $5 \Omega \cdot m$, on retrouve encore une nouvelle couche d'argile conductrice d'épaisseur sensiblement égale à la précédente, soit 20 m.

Nous avons alors décidé de systématiser ce phénomène d'alternance défini par la relation :

$$\Delta z \text{ de terrain conducteur} = \Delta z \text{ de terrain à } 5 \Omega \cdot m$$

et ce valant depuis la cote — 300 m jusqu'à la base des sables secs, soit — 100 m. Dans le cas considéré, Δz étant égal à 20 m, cela nous donnait une succession de six couches conductrices intercalées avec cinq couches à $5 \Omega \cdot m$. Pour que la partie P_1 de notre courbe théorique se superpose alors avec la partie P_1 de la courbe « C », nous dûmes attribuer à l'argile conductrice une résistivité égale à $0,1 \Omega \cdot m$.

Pour les autres cas à expliquer, nous avons gardé la même définition du phénomène « Alternance », soit six couches à $0,1 \Omega \cdot m$ et cinq couches à $5 \Omega \cdot m$

avec :

$$\Delta z \text{ à } 0,1 \Omega \cdot m = \Delta z \text{ à } 5 \Omega \cdot m.$$

Nous avons alors pu caler les parties P_1 de toutes nos autres courbes en jouant sur Δz . C'est ainsi que pour les courbes du type A :

$$\Delta z = 7 \text{ m}$$

et celles du type B :

$$\Delta z = 32 \text{ m}$$

Le fait de faire varier Δz nous a naturellement légèrement structuré les horizons sous-jacents puisque, jusqu'à la couche du paragraphe 7 incluse, nous avons laissé constantes les épaisseurs et les résistivités pour tous les cas traités.

En fait, il est évident que la solution utilisée est artificielle et qu'une autre explication plus conforme aux exigences géologiques consisterait par exemple à multiplier considérablement le nombre des couches conductrices en leur donnant une épaisseur plus réduite.

On élaborerait alors une définition appropriée du système d'alternance (Δz de couches conductrices et Δz de couches à $5 \Omega \cdot m$, nombres respectifs desdites couches, résistivité des couches conduc-

trices), qui rende compte de la position de la pente P_1 pour les courbes du type B. Pour expliquer tous les autres types de courbes, il suffirait alors de faire remonter vers la surface l'ensemble des couches alternées, quitte à éroder un certain nombre de celles situées aux approches de la base des sables secs. Ce nombre varierait suivant la courbe de résistivité apparente proposée.

Malheureusement, ce point de vue, même s'il peut mieux rendre compte de ce qui se passe réellement dans le sol, a le grave inconvénient d'accroître considérablement la complexité des calculs numériques permettant d'obtenir les courbes de résistivité apparente théorique.

Or, en fait, quel que soit le système d'explication choisi, pour rendre compte des courbes du type B, il faudra toujours insérer dans les horizons des paragraphes 1 et 2, situés sous les sables secs, beaucoup plus de terrain conducteur que pour expliquer les courbes du type A. L'ordre de grandeur de la résistivité du terrain conducteur et son épaisseur totale seront alors toujours déterminés par les cas limite du type B et les recoupements apportés par les sondages magnéto-telluriques effectués aux abords des forages pétroliers.

La plus ou moins grande épaisseur totale de terrain conducteur aura pour conséquence automatique, dans le cas envisagé, la structuration des terrains sous-jacents ; les plus grandes épaisseurs donnant des synclinaux, les moins grandes des anticlinaux.

Nous concluons donc qu'un système explicatif concernant la partie P_1 des courbes de résistivité apparente sera bon s'il rend compte, même par un schéma abstrait artificiel, de toutes les structurations de l'horizon turonien (qui constitue un repère géologique remarquable et relativement proche, profondeur moyenne = 800 m), chaque fois que des mesures magnéto-telluriques auront pu intervenir dans le voisinage de forages pétroliers donnant les cotes exactes de l'horizon en question. Or, c'est précisément là le mérite de notre solution telle que nous l'avons décrite plus haut. Nous choisirons donc ladite solution, même si elle est probablement destinée à être révisée ultérieurement dans le cas d'une multiplication importante des mesures de terrain.

b) Superposition de la partie J des courbes théoriques avec la partie J des courbes expérimentales.

L'ensemble de nos courbes théoriques ayant chacune leur partie P_1 correctement calée, intervient alors la partie de l'interprétation proposée la plus importante par sa portée pratique et industrielle.

Il s'agit en effet de voir dans quelle mesure la méthode M. T. va être sensible à la présence de l'eau salée située en profondeur et au contact des horizons pétrolifères.

Là encore, nous reviendrons, comme point de départ de la discussion, à la courbe « C » dont on sait qu'elle a le mérite d'avoir été tirée de mesures réalisées à côté d'un puits pétrolier connu. Les données du log électrique de forage laissaient à penser que l'épaisseur totale cumulée des couches d'eau salée ne devait pas excéder 40 m. Cela nous conduisait, pour retrouver l'amplitude de la partie J relative à la courbe expérimentale « C », à prendre pour ladite eau salée une résistivité de l'ordre de $0,05 \Omega \cdot m$. Cette faible résistivité peut surprendre au premier abord, mais outre le fait qu'elle a donné pour d'autres puits pétroliers des valeurs d'épaisseurs d'eau salée cumulées très compatibles avec l'expérience, il ne faut pas oublier que l'eau salée en question est particulièrement saturée et se trouve *in situ* dans des conditions assez spéciales et en particulier à une température de l'ordre de $150^\circ C$.

Les épaisseurs d'eau salée calculées dans ces conditions pour rendre compte de l'amplitude des courbes A_1 , A_2 , B_1 , B_2 sont les suivantes :

$$\begin{array}{ll} \Delta z_{A_1} = 30 \text{ m} & \Delta z_{A_2} = 60 \text{ m} \\ \Delta z_{B_1} = 60 \text{ m} & \Delta z_{B_2} = 120 \text{ m} \end{array}$$

Δz_{B_2} représente donc l'épaisseur maximale d'eau salée située au niveau des couches susceptibles d'être pétrolifères dans la région.

Dans le cas particulier où nous nous trouvons, le pouvoir de résolution de la méthode magnéto-tellurique devient pratiquement surprenant : en effet, les courbes de résistivité apparente sont sensiblement déformées au niveau de la partie « J » pour des variations de l'ordre de 20 m d'épaisseur d'eau salée, alors même que ladite eau salée se trouve située en moyenne à 3 300 m de profondeur.

Cette sensibilité extrême à la présence d'un conducteur, aussi intéressant pour le prospecteur et le producteur que l'eau salée de gisement, ouvre à la méthode de prospection que nous pratiquons de tels horizons que cela mérite que l'on s'y arrête.

B. La possibilité de détection des eaux salées et en particulier des eaux salées localisées au niveau des couches pétrolifères.

Disons d'emblée, pour éviter toute équivoque, qu'il est bien évident que si la magnéto-tellurique est particulièrement sensible à la présence d'eau salée, cette sensibilité vise naturellement les eaux salées en général et pas uniquement les eaux salées rencontrées au niveau des couches pétrolifères. Mais comme il est assez fréquent de rencontrer des gisements pétroliers comportant de l'eau salée de gisement, il peut être du plus haut intérêt de pouvoir déterminer les variations d'épaisseur de ladite eau salée. Il est en effet légitime d'estimer qu'il y a un lien entre ces variations d'épaisseur, même légères, et des variations morphologiques relatives à la disposition des couches en question.

L'existence de ce lien permet, ainsi qu'on va le voir, de détecter indirectement des formes même fort peu prononcées, à des profondeurs telles que les autres méthodes de prospection, sismique comprise, restent totalement aveugles dans le cas en question.

Nous allons préciser cet aspect des choses en faisant appel à des connaissances élémentaires de géologie relatives à la région qui nous intéresse. Ainsi que nous l'avons déjà décrit lors de l'énoncé des données géologiques, l'expression « horizon pétrolier » que nous avons jusqu'ici utilisée recouvre schématiquement la réalité suivante : on voit se succéder, vers le sommet d'un Cambro-Ordovicien compact de résistivité $4 \Omega \cdot m$ en moyenne, une série de cinq couches ayant chacune 25 m environ d'épaisseur, où les grès acquièrent une porosité telle qu'ils sont susceptibles de jouer le rôle de réservoir. Ces couches sont séparées les unes des autres par des compartiments imperméables n'excédant pas 1 à 2 m d'épaisseur et de résistivité égale à $4 \Omega \cdot m$. Cet ensemble se trouve situé en bloc dans la partie supérieure du Cambro-Ordovicien, pratiquement sous le Trias argileux.

Imaginons alors, ainsi que cela est représenté sur la planche 21, en un lieu donné une forme anticlinale très douce comportant un pendage très faible, du style de ceux rencontrés dans la province de Messaoud. Posons ce pendage égal à 1/100. Supposons maintenant que la forme anticlinale en question commence à se manifester à une distance de 2 km de son axe et qu'elle soit symétrique par rapport à ce dernier. Les couches situées au-delà de cette distance de 2 km de part et d'autre de l'axe retrouvent alors leur aspect plan et horizontal. La flèche maximale de la structuration ainsi déterminée sera de 20 m. Compte tenu de leur qualité de réservoir, les couches à bonne porosité se trouvant dans la région de l'axe anticlinal sont susceptibles de jouer le rôle de piège à pétrole. Supposons un cas pratique où, à l'aplomb de l'axe O, on trouve successivement dans chacune des cinq couches définies comme identiques entre elles, le réservoir imprégné d'huile sur 19 m d'épaisseur et envahi d'eau salée sur les 6 m inférieurs.

Le front de contact huile-eau salée étant supposé horizontal, la distance x représente la projection de la partie où il est possible de rencontrer de l'huile dans les couches poreuses qui sont naturellement concordantes entre elles. Compte tenu du pendage annoncé plus haut, $x = 3\ 800$ m, donc, en s'éloignant de l'axe O, on passera, jusqu'à ce que l'on ait parcouru 1 900 m, d'un lieu où l'épaisseur cumulée des couches d'eau salée est de 30 m à un lieu où ladite épaisseur vaut 125 m et reste constante si l'on continue à s'éloigner. Autrement dit, en imaginant qu'au-dessus du Turo-

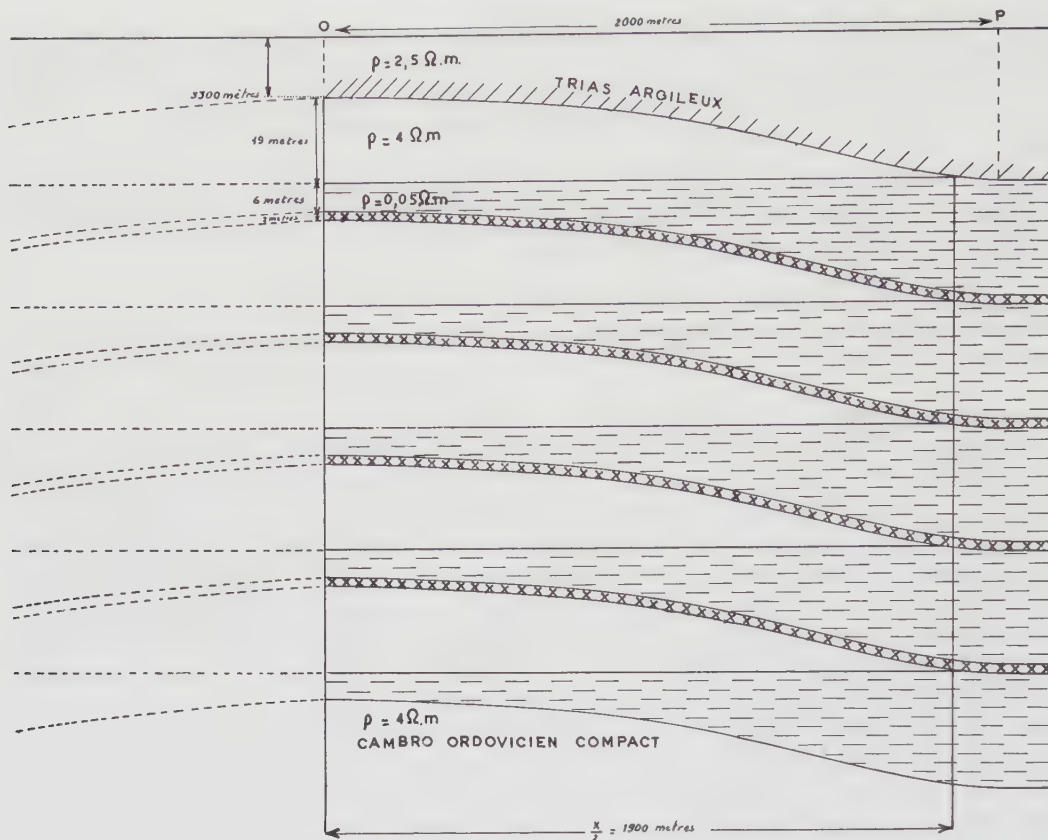


PLANCHE 21.

Exemple d'anticlinal faiblement structuré comportant des variations importantes d'épaisseur d'eau salée.

nien les horizons restent horizontaux et constants, si l'on réalise un sondage magnéto-tellurique à cheval sur l'axe anticlinal, on pourra avoir une courbe de résistivité apparente qui serait la courbe O, alors qu'en plaçant un autre sondage en position P, on aura la courbe P. Ces courbes sont assez différentes dans les périodes $T > 3$ s pour exclure toute confusion expérimentale quelle qu'elle soit. Ces résultats ont été obtenus en laissant constant le recouvrement situé au-dessus du Trias argileux et en le définissant conformément à la distribution résistivités-profondeurs déjà présentée (planche 22).

Bien entendu, les choses se passent dans la nature d'une manière moins géométrique et, en fait, il est rare que les abords d'un anticlinal ne présentent pas eux-mêmes un mouvement synclinal qui ne peut que renforcer les possibilités d'accumulation de l'eau salée.

Il peut être intéressant de voir maintenant quel serait, devant le cas que nous venons de décrire, le comportement de la sismique réflexion qui est jusqu'ici considérée comme l'*ultima ratio* lorsqu'il s'agit de prospection de détail. A supposer que le Cambro-Ordovicien, de par le jeu d'un contraste heureux de vitesses de propagation des ondes élastiques, devienne un niveau physiquement détectable par lesdites ondes, il n'en demeure pas moins qu'un dispositif de sismique réflexion étant installé sur la surface du sol au-dessus d'un flanc de notre anticlinal, les deux sismographes extrêmes

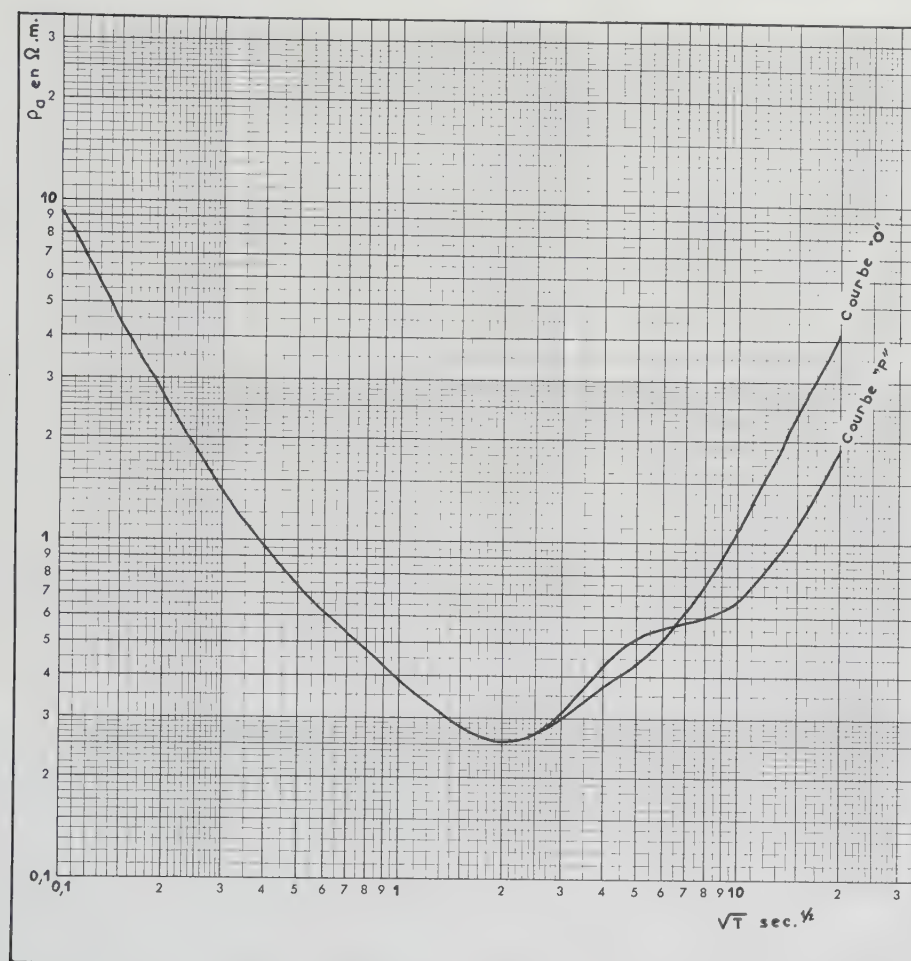


PLANCHE 22.

Courbes théoriques de résistivité apparente relatives à l'anticlinal présentant des variations d'épaisseur d'eau salée.

Courbe « O » : concerne la région de l'axe « O » ;

Courbe « P » : concerne la région du point « P ».

séparés de 600 m montreront, compte tenu du pendage de l'anticlinal, un décalage dans les arrivées des ondes réfléchies sur le Cambro-Ordovicien de l'ordre de 4 ms (profondeur moyenne du Cambro-Ordovicien 3 300 m et vitesse de propagation moyenne dans l'ensemble des terrains le recouvrant $V = 3\,000 - 3\,300 \text{ m/s}$).

Si maintenant l'on considère les corrections infligées aux mesures brutes pour tenir compte des variations de surface, les 4 ms en question deviennent de l'ordre de grandeur même des erreurs de mesure lorsqu'on ramène ces dernières à un plan de référence superficiel. Autrement dit, sans même invoquer les possibilités d'absorption de l'énergie sonore par des couches jouant le rôle de guide d'onde ou bien l'amortissement de cette énergie dû au long parcours imposé par la grande profondeur de l'horizon considéré, la sismique réflexion s'avère totalement impuissante devant le

problème que nous avons abordé et que la magnéto-tellurique résout avec une sensibilité particulière.

Les conséquences de cette propriété remarquable de la magnéto-tellurique pourront, au point de vue pratique, se classer sous deux rubriques :

a. Dans le cadre des travaux de production sur un champ pétrolier déjà repéré.

La magnéto-tellurique pourra constituer un outil tout à fait adapté au problème de la détermination de l'extension réelle d'un champ pétrolier. En effet, le procédé actuel utilisé pour reconnaître cette extension consiste le plus souvent, en s'appuyant sur les données sismiques, à placer des implantations de forages de plus en plus loin dans une direction donnée en s'éloignant du centre supposé de la structure et à arrêter lesdites implantations lorsqu'on arrive à une zone où les puits deviennent secs. Or, on peut penser, sans pour autant faire preuve de témérité excessive, que parfois après une zone stérile pourrait apparaître à nouveau, en poussant suffisamment loin les implantations, une zone intéressante au point de vue pétrolier. Cette idée est d'autant plus défendable qu'il est rare qu'un gisement pétrolier étendu constitue au niveau des couches productrices un bloc absolument homogène. La magnéto-tellurique, de son côté, pourrait alors, en dessinant les auréoles de plus ou moins grande accumulation d'eau salée de gisement et grâce à un simple raisonnement analogique, soit éviter les forages rencontrant les couches réservoirs totalement occupées par l'eau salée, soit éviter par manque d'audace l'abandon de structures pouvant être pétrolifères et qui, pour ainsi dire, gisent, mais en vain, sous les pieds du producteur.

b. Dans le cadre des travaux de prospection.

L'idée d'étendre à toute la région environnante, sur parfois un rayon de l'ordre de 50 ou 100 km, le travail mis en œuvre pour délimiter les frontières physiques d'un gisement pétrolier s'impose d'elle-même, car le bon sens suggère toujours que si l'huile a été découverte en un lieu donné, il peut être possible d'en trouver en des lieux pas trop éloignés du premier.

Pour clore les commentaires sur cette caractéristique remarquable de la méthode magnéto-tellurique, nous ferons deux remarques. La première est la suivante : le lecteur n'a pas manqué de constater que, pour expliquer les courbes A_1 et A_2 , B_1 et B_2 , nous avons utilisé une hypothèse de calcul où toutes les épaisseurs d'eau salée étaient accumulées en une couche unique. Pour lever l'équivoque, nous donnons les résultats du calcul numérique de la résistivité apparente dans deux cas relatifs à la courbe « O », concernant la région de l'axe anticlinal évoqué plus haut :

1) Valeurs de la courbe « O » calculée telle quelle reportée en fonction de $\sqrt{T}$ (épaisseurs d'eau salée cumulées).

2) Valeurs de la courbe « O » calculée lorsque la zone réservoir est découpée en cinq couches avec alternance de 19 m imprégnés d'huile et 6 m remplis d'eau salée.

Il est facile de constater l'identité des deux types de résultats.

RÉSISTIVITÉ APPARENTE ($\Omega \cdot m$).

$\sqrt{T}$	2,4	3	4	5,5	7,5	10	14	20	30
1	0,266	0,301	0,361	0,460	0,684	1,117	2,121	4,290	9,630
2	0,266	0,301	0,362	0,461	0,685	1,118	2,122	4,291	9,630

La deuxième remarque concerne les appréciations portées en général sur les propriétés de la méthode magnéto-tellurique, à qui souvent les prospecteurs utilisant des méthodes plus classiques veulent bien accorder tout au plus l'étiquette de méthode de grande reconnaissance. Nous pensons, sans avoir besoin d'y revenir, avoir montré que la magnéto-tellurique peut parfaitement jouer, le cas échéant, le rôle d'outil détecteur de détail et même d'extrême détail, au stade où en est la prospection industrielle.

Nous ajouterons, avant de clore ce paragraphe et à seule fin de donner des ordres de grandeur, les valeurs calculées de décalage de phase relatives aux deux cas de courbes « O » qui viennent d'être définies.

DÉCALAGE DE PHASE (grades).

$\sqrt{T}$	2,4	3	4	5,5	7,5	10	14	20	30
1	43,90	38,02	32,30	24,27	15,41	9,18	4,79	2,36	1,05
2	43,88	37,96	32,24	24,29	15,44	9,21	4,81	2,37	1,05

C. Confrontation des résultats théoriques $R(E)_o$ et $R(H)_o$ avec les résultats expérimentaux $R(E)_{ex}$ et $R(H)_{ex}$.

Les valeurs numériques prises en fonction de T par le rapport $R(E)_s = \frac{(B_{n+1})_T}{(B_{n+1})_{T_0}}$ sont reportées sur la planche 23.

Les valeurs correspondantes $R(H)_s$ figurent sur la planche 24.

D. Suggestions concernant une explication des décharges telluriques.

Ainsi qu'on a pu le remarquer, à la suite de la description des « décharges telluriques », le trait dominant qui semble bien caractériser ce phénomène en un lieu donné est avant tout son aspect local et polarisé. On sait également que ces décharges telluriques sont affectées d'un niveau qui varie constamment mais le plus souvent est très élevé.

Il convient d'apporter deux éléments complémentaires aux descriptions antérieures développées dans ce que nous avons appelé les tests α , β et γ .

Revenons tout d'abord au rythme d'apparition de ces phénomènes dont nous avons dit qu'il était absolument imprévisible. Il est bon d'ajouter à ce propos que les « décharges telluriques » apparaissent aussi bien la nuit que le jour et qu'il nous a d'ailleurs toujours été impossible de lier leur présence à des variations météorologiques apparentes.

D'autre part, nous avons pu constater le synchronisme quasi systématique entre, d'une part la « décharge tellurique » telle que la captait nos instruments de mesure, et d'autre part une série de crachements violents transmis par le haut-parleur d'un petit poste portatif de T. S. F. situé à quelques mètres du camion laboratoire. Le poste en question, d'un modèle très courant, était alimenté par des piles électriques et ne présentait donc aucun point de référence commun avec le matériel de mesure déjà évoqué.

L'ensemble des observations réunies à propos des « décharges telluriques » nous semble malheureusement insuffisant pour dépasser le stade des conjectures purement qualitatives.

A ce propos, la première question qui se pose est la suivante : a-t-on affaire à un phénomène

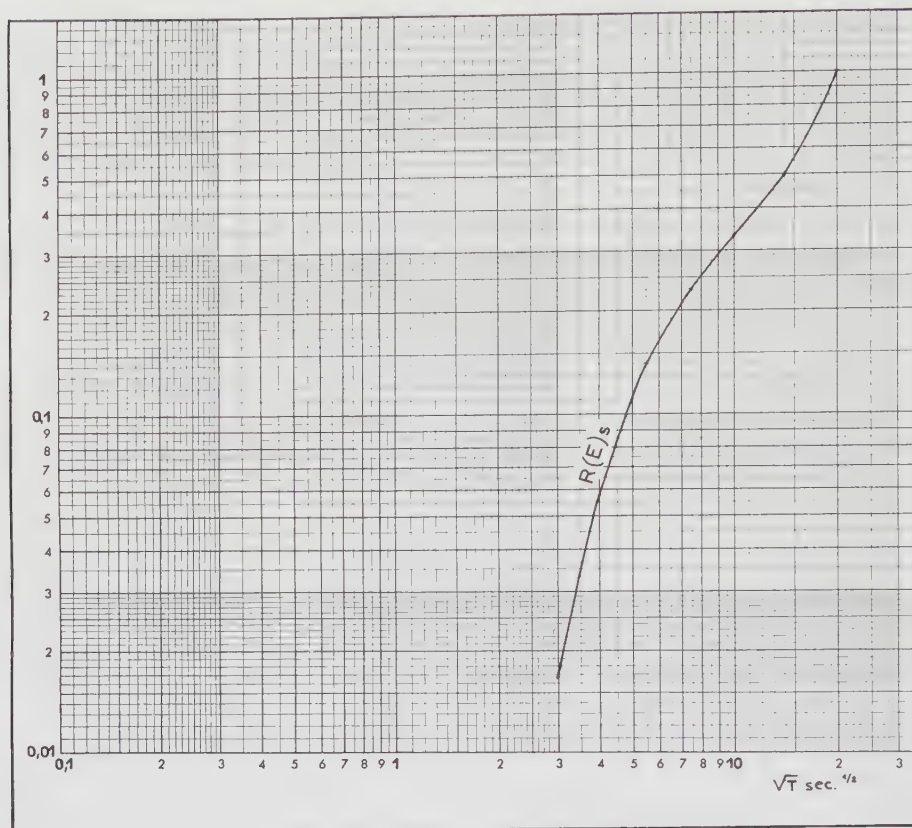


PLANCHE 23.

d'origine purement naturelle ou bien à un phénomène consécutif à une activité humaine quelconque ?

Parmi les phénomènes d'origine purement naturelle, nous trouvons bien entendu les manifestations énergétiques intervenant dans l'atmosphère : décharges électriques, orages magnétiques, etc. Il faut peut-être à ce propos tenir compte de la latitude de la région prospectée (trente degrés environ) qui se trouve être considérablement plus proche des zones orageuses tropicales que les régions d'Europe où nous n'avons jamais observé de phénomènes comparables.

Dans un autre ordre d'idées, on pourrait envisager aussi des effets électrostatiques provoqués par des tourbillons convectifs locaux dus aux variations importantes de température intervenant aussi bien le jour que la nuit au niveau de la surface du sol.

Si, maintenant, nous abordons la catégorie des phénomènes artificiels possibles, il ne faut pas oublier que la région qui fut l'objet de nos mesures est caractérisée par l'exploitation du gisement pétrolier de Messaoud où, outre de nombreuses opérations de production habituelles dans un tel cas, sont pratiquées des réinjections importantes de gaz au niveau des couches pétrolifères. Il n'est pas impossible, dès lors, que la région en question soit le siège d'importants phénomènes d'électrofiltration générateurs de signaux électromagnétiques, et consécutifs à un réajustement perpétuel mais saccadé des pressions des fluides situés dans lesdites couches pétrolifères.

Parmi les causes artificielles éventuelles, il faudra également tenir compte de la présence dans

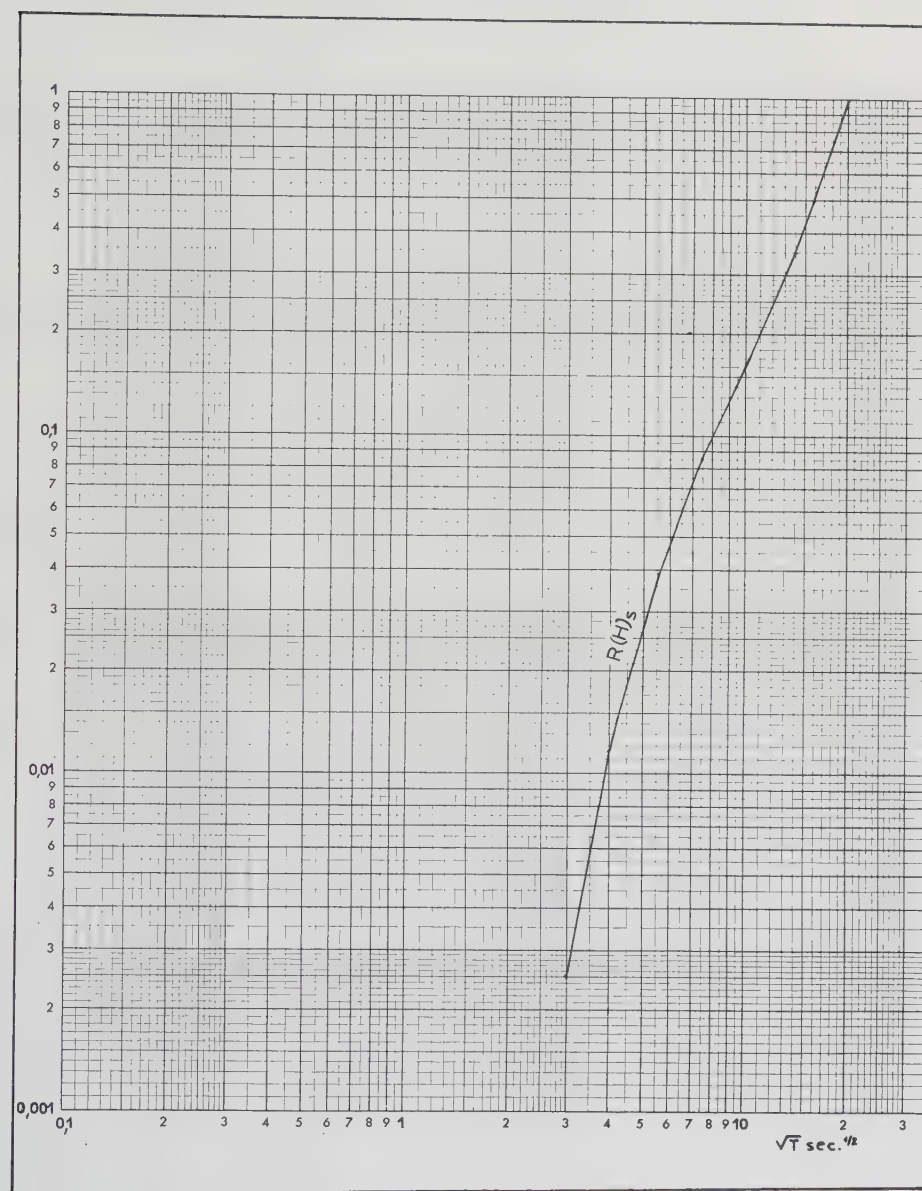


PLANCHE 24.

cette région de réseaux de pipe-lines, susceptibles de véhiculer toutes sortes de signaux électriques. Toutefois, en ce qui concerne toute explication des « décharges telluriques » faisant intervenir une origine artificielle, il ne faudra pas oublier, pour des raisons de prudence, que nous avons rencontré ces manifestations curieuses dans une région malgré tout assez vaste, puisque nous nous sommes éloigné parfois de plus de 120 km par rapport au gisement pétrolier de Messaoud.

Comme on le voit, la question des « décharges telluriques » est loin d'être résolue et il sera, à ce propos, intéressant de réunir des observations supplémentaires. En particulier, des enregistrements simultanés à partir de deux stations indépendantes dont on ferait varier l'écartement apporteraient des précisions intéressantes sur un phénomène dont on peut dire qu'il s'est surtout manifesté à nous comme une cause d'ennuis supplémentaires dans l'art d'enregistrer correctement les variations magnéto-telluriques normales.

L'auteur exprime sa reconnaissance à la Direction de la *S. N. Repal*, qui a bien voulu l'autoriser à utiliser des résultats de mesures intervenant dans cette publication.

DEUXIÈME PARTIE ⁽¹⁾

CHAPITRE III

LE PROCESSUS D'ENREGISTREMENT ET D'ANALYSE

I. Généralités sur la mesure des variations magnéto-telluriques.

Nous avons déjà très succinctement exposé ce processus dans le premier chapitre. Il est temps maintenant d'en voir les détails et d'en dégager les avantages, compte tenu des difficultés rencontrées par l'expérimentateur à cause de la nature même des variations magnéto-telluriques.

Rappelons, comme point de départ à ce chapitre, que le but du prospecteur pratiquant la magnéto-tellurique, dans l'état actuel de la technique, consiste surtout à pouvoir déterminer, pour chaque période prise isolément dans le spectre, le rapport E/H des amplitudes respectives des variations du champ électrique naturel et du champ magnétique correspondant, le décalage de phase existant alors entre ces deux types de variations étant encore difficilement accessible.

Pratiquement, pour atteindre ce rapport E/H en fonction de T, le prospecteur en question, dans la mesure où il aura affaire à des terrains homogènes, isotropes et de faibles pendages, pourra, à l'aide de capteurs appropriés, se contenter d'enregistrer et d'analyser les variations simultanées d'une composante horizontale du champ électrique et de la composante horizontale du champ magnétique qui lui est perpendiculaire.

Nous allons maintenant passer brièvement en revue les différents aspects du problème posé, d'une part, par les caractéristiques mêmes des variations magnéto-telluriques et, d'autre part, par les caractéristiques de la technique telle qu'on peut l'avoir actuellement à sa disposition, avec ses possibilités et ses limitations.

(¹) La première partie de cet article est parue dans le numéro d'octobre 1969 de la *Revue de l'Institut Français du Pétrole*.

Le capteur électrique peut être des plus simples ; il suffit d'utiliser ce qu'on appelle une ligne tellurique ; deux électrodes sont plantées en terre, par exemple à quelques centaines de mètres l'une de l'autre, et reliées par des câbles isolés aux bornes de l'appareil de mesure ou d'enregistrement (galvanomètre, électromètre, amplificateur électronique, etc.). On dispose actuellement en technique courante d'un grand choix de capteurs magnétiques, autrement dit de magnétomètres ou de magnétographes. On citera par exemple les balances ou variomètres magnétiques comportant un aimant mobile supporté par un couteau de balance ou un fil de quartz, les magnétomètres dont l'aimant mobile est suspendu à un fil de torsion vertical, les bobinages dans lesquels une force électromotrice est induite par la variation du flux magnétique les traversant, ces bobinages comportant éventuellement un noyau de grande perméabilité magnétique destiné à accroître la sensibilité et se trouvant parfois avantageusement associés à un flux-mètre. On peut encore citer dans ce domaine les dispositifs fondés sur l'effet Hall. Assez récemment, divers types de magnétomètres nucléaires ont fait aussi leur apparition sur le marché.

La ligne tellurique telle qu'on vient de la décrire permet sans difficulté d'obtenir des enregistrements très fidèles de la variation du champ électrique naturel, pour toutes les périodes T qu'il est utile de prendre en considération. En pratique, l'enregistrement tellurique ne traduit quand même pas avec une rigueur ni une fidélité absolues les variations dudit champ électrique, mais il est facile, par un étalonnage simple de l'appareillage, de tenir compte des petites imperfections et distorsions éventuelles portant sur les amplitudes et les phases. Toutefois, l'utilisation depuis ces dernières années d'amplificateurs ou d'adaptateurs d'impédance électroniques comportant des impédances d'entrée colossales de l'ordre de $10^{12} \Omega$ ou plus ont rendu ces étalonnages pratiquement inutiles.

Il est également possible d'obtenir à l'aide d'un capteur approprié un enregistrement fidèle, ou très approximativement fidèle, des variations magnétiques dans tel ou tel domaine de périodes plus ou moins étendu : par exemple, les magnétomètres nucléaires permettent en principe de suivre rigoureusement les variations du champ magnétique naturel, depuis les périodes les plus courtes utiles au prospecteur jusqu'aux variations les plus lentes. Par suite de leur inertie mécanique, les magnétomètres à aimant mobile ne peuvent pas suivre les variations trop rapides du champ magnétique naturel, et il n'est guère possible d'envisager leur utilisation quand les périodes T deviennent inférieures à quelques secondes. Cependant, pour des périodes plus grandes, ils permettent eux aussi d'obtenir des enregistrements fidèles de la variation magnétique.

Un bobinage avec ou sans noyau à haute perméabilité magnétique peut fournir également un enregistrement fidèle, sinon du champ magnétique, du moins de sa dérivée par rapport au temps, à la condition qu'il ne comporte qu'un nombre de spires assez faible. Il est d'ailleurs à remarquer qu'il est indifférent d'enregistrer le champ ou sa dérivée puisque les rapports d'amplitude et de phase entre une grandeur sinusoïdale et sa dérivée sont connus a priori.

Dans le choix d'un capteur magnétique, pour le cas envisagé, il faut essentiellement tenir compte du fait que l'ordre de grandeur de l'amplitude des variations du champ magnétique devient en général très petit dans le domaine des périodes inférieures à la seconde. Par exemple, en ce qui concerne notre campagne de mesures au Sahara, si l'on s'en réfère à la planche 6, on constate que déjà, pour des périodes de l'ordre de 10 s, les valeurs statistiques du module du champ magnétique ne dépassent pas 0,01 γ . Toutefois, si l'on se rapporte à des cas plus courants où les types de terrains qui font l'objet de la prospection comportent des épaisseurs de conducteurs nettement moindres que celles que nous avons rencontrées au Sahara, c'est pour des périodes s'abaissant aux alentours de 0,1 ou 0,01 s que les amplitudes de 0,01 γ sont atteintes.

Or le prospecteur, dans ces cas-là, est tenu d'étendre ses mesures jusqu'au domaine de ces courtes périodes qui prennent alors une importance géologique toute particulière.

Il se trouve donc que, dans l'état présent de la technique, la plupart des types de capteur ont une sensibilité beaucoup trop faible dans cette partie du spectre. Les capteurs à induction deviennent

alors inévitables, et il faut leur conférer une sensibilité suffisante par l'adoption d'un très grand nombre de spires de fil relativement fin, enroulé ou non sur un noyau à haute perméabilité magnétique. Avec un bobinage de ce genre, la self-induction est énorme et les capacités propres des bobinages sont loin d'être négligeables ; des effets de résonance dans la bobine prennent une grande importance. On peut même être conduit à ajouter des éléments extérieurs, par exemple des condensateurs, pour créer des effets de résonance favorables à un accroissement de sensibilité dans telle ou telle région du spectre.

II. Le dispositif de mesure que nous avons conçu et utilisé.

A. Le principe.

De ce qui précède, il ressort que les exigences de la pratique, c'est-à-dire disposer d'une sensibilité suffisante et ne pas avoir de distorsion dans l'enregistrement, sont contradictoires. Comme le besoin de sensibilité primait à nos yeux sur tout autre considération, notre choix s'est porté sur un capteur à induction, et nous avons été obligé de nous contenter d'enregistrements qui sont très infidèles, c'est-à-dire qui déforment profondément et de façon compliquée les amplitudes et les phases. En théorie, il est assurément toujours possible de procéder à un étalonnage préalable de l'appareillage magnétique en amplitude et en phase, en fonction de la période. Il est clair cependant que si les déformations du signal d'entrée sont très marquées, il en résultera une grande imprécision dans le résultat final, d'autant plus qu'on a affaire à des étalonnages dynamiques où l'appareillage fonctionne dans des conditions assez éloignées de celles qu'imposent la nature et l'ordre de grandeur du phénomène.

Étant donné l'intérêt présenté par la prospection magnéto-tellurique, et en vue de remédier aux inconvénients majeurs précités, nous avons eu l'idée, qui constitue la base même du procédé, d'introduire dans l'une au moins des chaînes, magnétique ou tellurique, des distorsions supplémentaires, choisies de telle manière que soient rendus accessibles, d'une façon simple en fonction de la période T , d'une part le déphasage existant entre les signaux telluriques et magnétiques excitateurs pénétrant respectivement dans chaque chaîne d'enregistrement et, d'autre part, le rapport des amplitudes desdits signaux.

A cet effet, un dispositif de mesure, conçu selon le présent principe, comporte essentiellement un ensemble générateur de distorsions supplémentaires inséré sur l'une ou l'autre au moins des deux chaînes, la magnétique ou la tellurique, et choisi de manière telle que les deux signaux excitateurs subissent en définitive, entre l'entrée et la sortie de leur chaîne respective, une distorsion identique ou pratiquement identique, et que par conséquent les décalages de phase en fonction de la période T considérée, existant entre les signaux de sortie, soient identiques ou en relation très simple avec les décalages de phase existant entre les signaux excitateurs, de même que le rapport des amplitudes, considéré comme fonction de la période T , des signaux de sortie, soit identique ou en relation très simple avec le rapport des amplitudes des signaux d'entrée. Ce dispositif de mesure a donné lieu au dépôt de divers brevets tant en France qu'à l'étranger (4).

B. Application du principe.

Nous allons voir maintenant comment l'expérimentateur, utilisant comme capteur magnétique un capteur à induction, peut mettre en œuvre le principe que nous venons d'exposer.

Mais, tout d'abord, il nous semble nécessaire de voir de plus près le comportement des tensions captées en sortie d'un capteur à induction excité par un champ magnétique variable lorsque le capteur en question débite sur un amplificateur présentant une forte impédance d'entrée.

a. Théorie simplifiée du capteur à induction branché aux bornes d'entrée d'amplificateurs caractérisés par une haute impédance purement ohmique.

Un tel capteur magnétique est constitué par un bobinage comportant un grand nombre de spires enroulées sur un noyau d'air ou de métal à haute perméabilité magnétique, ce qui lui confère naturellement une assez forte impédance.

Étant donné nos conditions d'utilisation, l'expérience a montré que ce bobinage, quelles que soient sa forme et sa complexité, peut être symbolisé par le schéma représenté par la figure 1 de la planche 25.

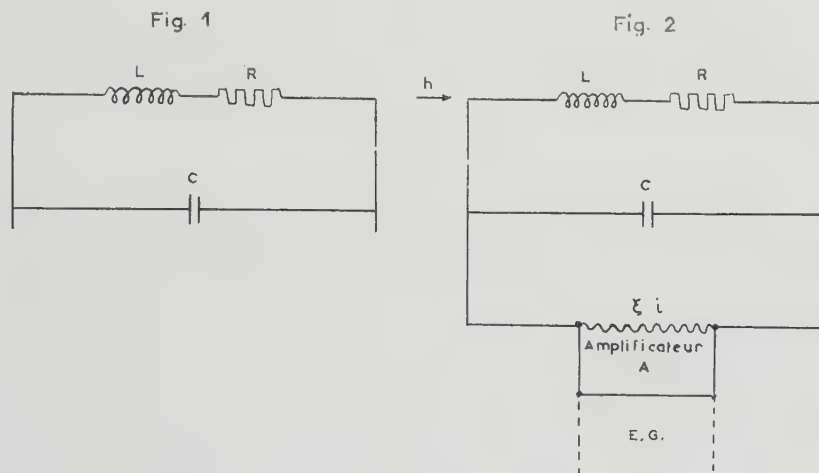


PLANCHE 25.

La capacité C est une capacité soit de construction, soit une capacité de construction plus une capacité ajoutée en vue de créer un filtrage éventuel grâce à l'utilisation d'une surtension appropriée.

Soit maintenant (fig. 2, planche 25) l'ensemble constitué par la bobine qui vient d'être décrite, placée aux bornes d'une chaîne amplificatrice et enregistreuse $E. G.$ L'impédance d'entrée de l'amplificateur étant ξ . Pour simplifier, on assimilera cette dernière à une résistance pratiquement pure. L'axe de la bobine étant placé selon une composante h d'un champ magnétique fonction du temps, le courant i passant dans ξ est donné par la relation suivante :

$$L\xi C \frac{d^2 i}{dt^2} + (\xi RC + L) \frac{di}{dt} + (R + \xi)i = \xi \frac{dh}{dt} \quad [1]$$

avec :

$$\xi = \mu_a \cdot N \cdot S$$

μ_a = perméabilité apparente du noyau ;

N = nombre de spires de la bobine ;

S = surface moyenne d'une spire.

Cherchons d'abord une solution de cette équation correspondant à un régime stationnaire d'oscillations forcées de période $T = \frac{2\pi}{\omega}$.

Posons $h = H \cos \omega t$, le courant i s'exprime par la relation :

$$i = I \sin (\omega t - \varphi) \quad [2]$$

où :

$$I = \frac{\chi H \omega}{\Xi}$$

avec :

$$\Xi = \sqrt{(R + \xi)^2 + (L^2 - 2\xi^2 LC + R^2 \xi^2 C^2) \omega^2 + L^2 \xi^2 C^2 \omega^4}$$

et :

$$\varphi = \text{Arctg } \omega \cdot \frac{L + \xi RC}{R + \xi - \omega^2 \xi LC}$$

L'expression de i lors de la résonance caractérisée par $\omega_0 = \sqrt{\frac{R + \xi}{\xi LC}}$ devient :

$$i = \frac{-\chi H}{L + \xi RC} \cos \omega t$$

b. Exemples de réalisation de capteurs magnétiques à induction. Étalonnages.

Nous avons eu l'occasion, au cours de ces dernières années, de mettre en œuvre un nombre assez important de capteurs de formes diverses. Ces appareils peuvent se grouper essentiellement en deux catégories : les bobinages ne comportant pas de noyau à forte perméabilité magnétique, et les bobinages qui en comportent.

Pour fixer les idées, nous donnerons successivement la description d'un capteur de chaque type, en dégagant ensuite par comparaison les avantages pratiques qui nous ont semblé les plus appréciables à propos de chacun de ces capteurs. Pour clore cette discussion, nous aborderons la question des étalonnages de ces capteurs et exposerons à cette occasion un procédé que nous avons utilisé fréquemment et qui nous a paru particulièrement pratique. Ce procédé d'étalonnage ne concerne en fait d'ailleurs que les capteurs constitués d'un bobinage enroulé sur un noyau à forte perméabilité magnétique.

α . Le capteur Ca_1 , ou un exemple de capteur à induction avec noyau d'air.

Le capteur en question est représenté schématiquement sur la première figure de la planche 26. Conjointement au dessin est explicitée la liste de ses caractéristiques géométriques, électriques et mécaniques. Sur la figure portant l'indice Ca_1 de la planche 27, on peut voir la courbe de réponse de ce capteur affecté d'une capacité $C = 2 \cdot 10^{-6}$ F disposée en parallèle, lorsqu'il est soumis à une excitation constituée par un champ harmonique de période variable, mais de module constant égal à 10^{-2} γ. A vrai dire, cette courbe de réponse, qui exprime en volts le niveau de la tension existant, dans le cas de l'excitation qui vient d'être définie, aux bornes du bobinage Ca_1 , est tracée en fonction de la fréquence et non de la période. Ce procédé de report nous a en fait pratiquement été imposé par les usages en vigueur dans le domaine de la technologie électronique que nous avons utilisée dans notre appareillage de mesure.

β . Le capteur Ca_2 , ou un exemple de capteur à induction avec noyau à forte perméabilité magnétique.

L'introduction sur le marché d'amplificateurs électroniques que nous représentons par le symbole A, à faible bruit de fond et à forte impédance d'entrée, a permis ces dernières années de pouvoir utiliser des capteurs magnétiques constitués par un nombre énorme de tours de fil enroulés sur un noyau de métal à grande perméabilité magnétique. Nous avons alors, ainsi que beaucoup

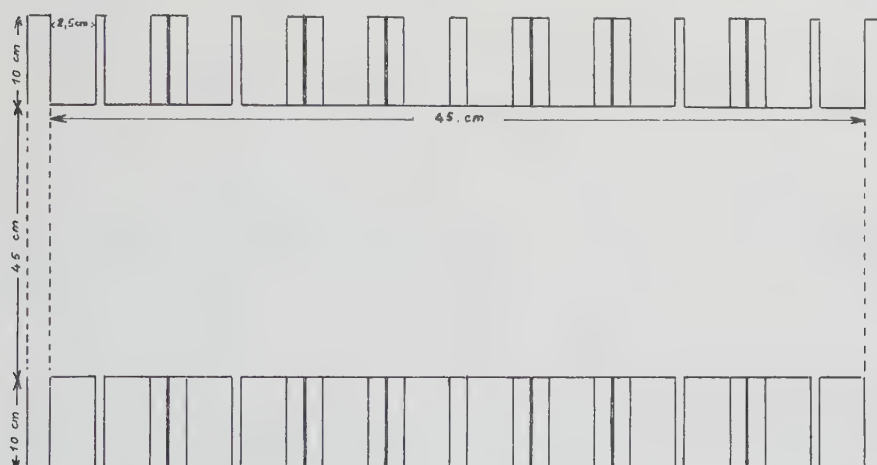
d'autres, utilisé comme noyau, une barre de mu-métal au molybdène de 2 m de long et présentant une section circulaire de 3 cm de diamètre. Le schéma du capteur Ca_2 est reporté sur la deuxième figure de la planche 26, et conjointement est donnée la liste de ses caractéristiques.

Sur la planche 27 est représentée avec l'indice Ca_2 la courbe de réponse le concernant, lorsque la capacité d'accord montée en parallèle est égale à 10^{-6} F. Cette courbe a été tracée dans des conditions d'excitation absolument identiques à celles mises en œuvre pour Ca_1 .

γ . Les avantages respectifs de Ca_1 et de Ca_2 .

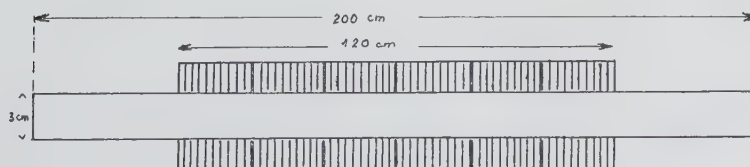
L'impression qui se dégage d'emblée, après examen des figures et des caractéristiques qui viennent d'être citées, c'est que le capteur Ca_1 est nettement moins intéressant que le capteur Ca_2 , puisque

1°) CAPTEUR Ca_1 : Bobinage avec noyau d'air



Nb de spires	: $1,53 \cdot 10^5$	L	: $8,1 \cdot 10^3$ Henrys	R	: $8 \cdot 10^4$ ohms
Surf. moyenne spire	: $2,04 \cdot 10^3$ cm ²	$\chi = NS = 3,13 \cdot 10^8$ cm ²		Poids	: 150 kg
Epaisseur bobinée	: 6 cm				

2°) CAPTEUR Ca_2 : Bobinage enroulé sur un noyau constitué par une barre de mu-métal au molybdène



Nb de spires	: $6 \cdot 10^5$	L	: $2,5 \cdot 10^5$ Henrys	R. naturelle	: $2,5 \cdot 10^5$ ohms
Surf. moyenne spire	: 20,4 cm ²	$\chi = NS \times \mu_0 = 3,67 \cdot 10^8$ cm ²		R. fonctionnement	: $6,35 \cdot 10^5$ ohms
Epaisseur bobinée	: 2 cm	Poids	: 25 kg		

PLANCHE 26.

Exemples de capteurs magnétiques à induction.

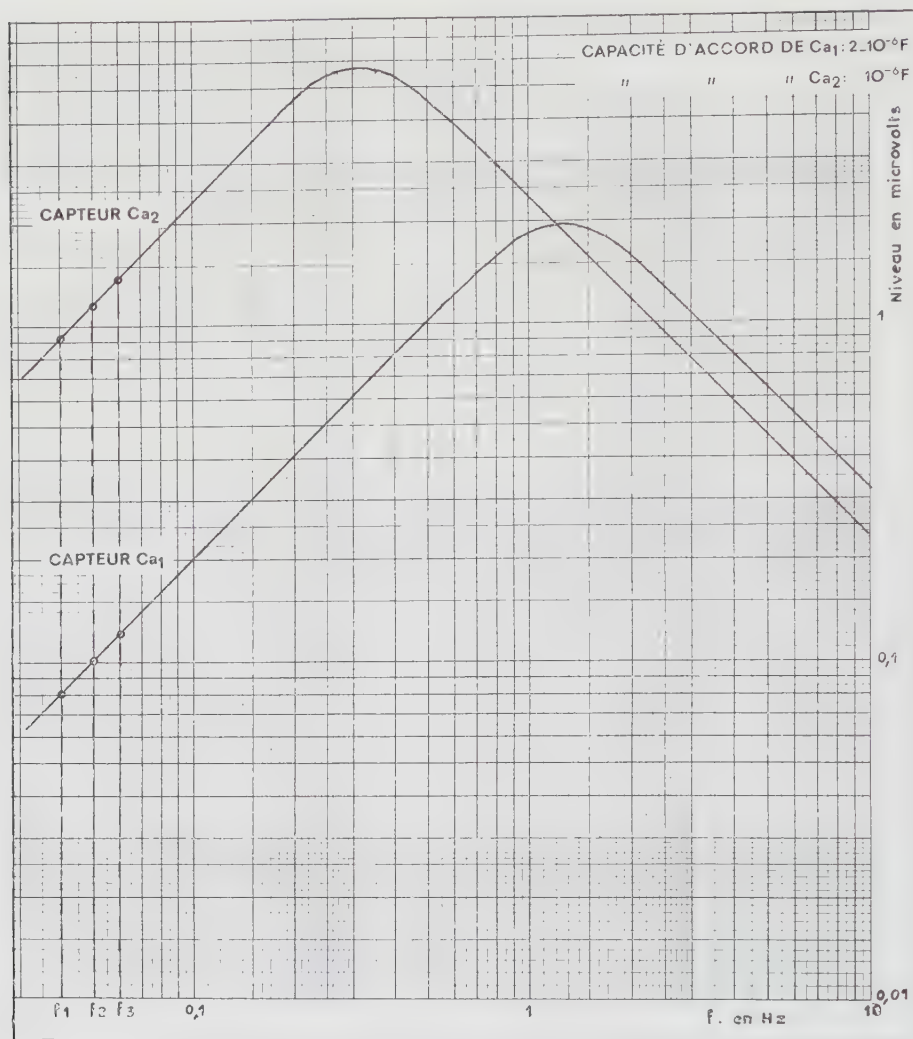


PLANCHE 27.

Courbes de réponse en fonction de la fréquence des deux capteurs magnétiques Ca₁ et Ca₂ excités par un champ magnétique harmonique de module constant et égal à 1/100 de gamma.

la sensibilité du premier est très inférieure à celle du second, et ce pour un poids bien plus considérable. Toutefois, avant de condamner définitivement les capteurs à noyau d'air, nous signalerons à leur actif deux avantages indéniables : tout d'abord, bien que l'exemple que nous offrons ne soit pas très représentatif en ce domaine, il faut signaler que seuls les bobinages à noyau d'air permettent, d'une manière générale, de s'engager sans crainte dans l'exploration de variations magnétiques dont le spectre se situe dans les périodes courtes de l'ordre de 10^{-2} s, alors que les bobinages comportant un noyau à forte perméabilité magnétique donnent des courbes de réponse qui sont fortement affectées par la présence de courants de Foucault induits dans le noyau. Les différents aspects de ce problème ont d'ailleurs déjà été largement traités par différents auteurs et nous n'y

reviendrons pas. Par contre, nous insisterons sur le deuxième avantage offert par les capteurs du type Ca_1 par rapport à ceux du type Ca_2 : il s'agit d'une aisance remarquable dans le domaine de l'étalonnage, ce qui nous amène à aborder le paragraphe suivant.

8. *Étalonnage des capteurs magnétiques à induction.*

Nous allons d'abord définir ce que nous entendons exactement par « étalonner un capteur magnétique à induction », qu'il soit du type Ca_1 ou du type Ca_2 . Pour cela, nous renverrons le lecteur à l'énoncé de la relation [1] régissant le comportement du courant i , et partant de la tension ξi située aux bornes d'entrée de l'amplificateur A. Cette relation revêt l'aspect d'une équation différentielle dont le second membre — $\chi \frac{dh}{dt}$ représente l'excitation à laquelle est soumis le capteur lorsque le champ magnétique varie. Nous définirons l'étalonnage d'un capteur à induction comme la détermination de la valeur du terme χ , qui est d'ailleurs homogène à une surface. Cette définition se justifie facilement. En effet, étant donné un capteur du type Ca_1 , ou bien du type Ca_2 , shunté par une capacité de valeur appropriée, il est toujours possible d'obtenir une courbe de réponse du genre de celles qui figurent à la planche 27, lorsqu'on excite le capteur en question par un champ de période variable et de module constant mais absolument quelconque et inconnu, qui peut être produit par exemple par une autre bobine située à une distance quelconque du capteur, ou bien encore par un aimant tournant de moment quelconque, et également inconnu.

Le problème majeur de l'étalonnage qui se pose alors est bel et bien de caler la courbe de réponse ainsi obtenue en fonction du module du champ exciteur. La relation [2] de la page 1291 donnant comme expression de la tension destinée à être amplifiée :

$$\xi i = \frac{\xi \chi H \omega}{\Xi} \sin(\omega t - \varphi)$$

lorsque le champ exciteur est de la forme $h = H \cos \omega t$, nous montre en effet que la connaissance du terme χ permet précisément ce calage. Or, dans le cas d'un capteur du type Ca_1 , ce terme χ_{Ca_1} est connu par construction : il peut en effet être assimilé au produit NS , où N est le nombre total de spires constituant le bobinage et S la surface de la spire moyenne. Lorsque le capteur a été soigneusement construit, le nombre de tours N est en général connu à un tour près par galette composant la bobine, ce qui implique une erreur infime puisque, dans le cas de Ca_1 par exemple, on a 12 galettes et 153 000 tours. Quant à la surface de la spire moyenne, elle peut être connue avec une précision qui, pour être moindre que la précédente, n'en est pas moins excellente et atteint facilement la valeur de 1/100. On pourra donc considérer que l'étalonnage du capteur Ca_1 a été réalisé pratiquement avec une précision de 1/100.

Voyons maintenant quelle est la méthode de détermination du terme χ_{Ca_2} pour un capteur du type Ca_2 . On suppose naturellement que la courbe de réponse « non calée », due à une excitation de module inconnu mais constant, a été tracée en fonction de la fréquence. On va alors procéder sur le terrain à deux enregistrements simultanés des variations magnétiques naturelles mettant en œuvre, d'une part le capteur Ca_2 et, d'autre part, le capteur Ca_1 pour lequel on a déjà déterminé la valeur du terme χ_{Ca_1} . Chaque capteur est respectivement shunté par les capacités dont les valeurs sont données planche 27, avec les courbes de réponse. On a pris soin de disposer à la surface du sol les deux capteurs qui sont séparés l'un de l'autre par une distance assez importante, de l'ordre de 80 m par exemple, de façon à être sûr qu'aucune interaction entre bobinages ne puisse être possible. En outre, les capteurs ont été respectivement calés suivant des axes parallèles l'un à l'autre. Chaque capteur est branché aux bornes d'un amplificateur A. Chaque amplificateur à son tour débite dans une voie différente d'un même enregistreur magnétique. Les gains des deux

amplificateurs pourront être différents. Soit g_1 le gain affiché dans la voie d'enregistrement où est placé Ca_1 . Soit g_2 le gain affiché dans la voie d'enregistrement où est placé Ca_2 . On procède alors aux enregistrements initialement annoncés pendant une durée de l'ordre d'une heure et demie par exemple. On procède ensuite, sur chaque voie, à une série de *playbacks*, en filtrant selon le procédé déjà présenté la tension brute enregistrée pour en extraire les tensions composantes relatives à diverses fréquences $f_1, f_2, f_3, \dots$, telles qu'elles sont indiquées sur la planche 27. Les deux tensions ainsi obtenues en fonction du temps et relatives pour chaque voie à une même fréquence, f_1 par exemple, présentent entre elles des corrélations remarquables. Soit alors $\mathcal{C}_1^{f_1}(t)$ la tension filtrée en question issue de la chaîne d'enregistrement où figure Ca_1 . Soit également $\mathcal{C}_2^{f_1}(t)$ la tension correspondante issue de la chaîne d'enregistrement où figure Ca_2 .

Choisissons maintenant un intervalle de temps dont les bornes sont t_1 et t_2 et calculons les deux intégrales :

$$\mathcal{J}_1 = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \mathcal{C}_1^{f_1}(t) dt \quad \text{et} \quad \mathcal{J}_2 = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \mathcal{C}_2^{f_1}(t) dt$$

Le rapport $\frac{\mathcal{J}_1}{\mathcal{J}_2}$ restera constant pour toute une série de fréquences suffisamment basses et il est en outre une fonction simple de χ_{Ca_1} et de χ_{Ca_2} , puisqu'il s'exprime alors sous la forme :

$$\frac{\mathcal{J}_1}{\mathcal{J}_2} = \frac{\chi_{Ca_1}}{\chi_{Ca_2}} \cdot \frac{g_1}{g_2}$$

En effet, si l'on s'en rapporte à l'expression qui donne le module de la tension située à la sortie d'un capteur à induction excité par un champ magnétique harmonique de période T et de module H , le capteur étant branché aux bornes d'un amplificateur à forte impédance d'entrée ξ , ξ étant de l'ordre de $5 \cdot 10^7 \Omega$, on a :

$$\xi I = \frac{\chi H \omega \xi}{\Xi}$$

avec :

$$\Xi = \sqrt{(R + \xi)^2 + (L^2 - 2\xi^2 LC + R^2 \xi^2 C^2) \omega^2 + L^2 \xi^2 C^2 \omega^4}$$

Quand ω devient suffisamment petit, quel que soit le capteur envisagé, puisque R est toujours négligeable devant ξ :

$$\Xi \approx \xi$$

d'où :

$$\xi I \approx \chi H \omega$$

Si donc on suppose maintenant que les deux capteurs Ca_1 et Ca_2 , disposés ainsi qu'il a été décrit plus haut, sont soumis en même temps à une même excitation telle qu'elle vient d'être définie, le rapport des modules des tensions obtenues respectivement en fin de chaîne d'enregistrement s'écrira :

$$\frac{\xi I_{Ca_1}}{\xi I_{Ca_2}} = \frac{\chi_{Ca_1}}{\chi_{Ca_2}} \cdot \frac{g_1}{g_2}$$

Si l'on a affaire, ainsi que c'est le cas avec les variations magnétiques naturelles, à une excitation dont le module, pour une période T donnée, varie en fonction du temps, on substituera au rapport $\frac{\xi I_{Ca_1}}{\xi I_{Ca_2}}$ le rapport $\frac{\mathcal{J}_1}{\mathcal{J}_2}$.

Ces résultats sont valables quels que soient les capteurs en présence, à condition toutefois de choisir des fréquences suffisamment basses pour le calcul du rapport $\frac{\mathcal{I}_1}{\mathcal{I}_2}$.

En conséquence, il sera toujours possible de connaître la valeur du terme χ caractérisant n'importe quel capteur à induction, lorsqu'on a à sa disposition un autre capteur, à noyau d'air de préférence, et de coefficient χ connu.

On obtient naturellement une valeur du terme χ particulièrement précise en prenant comme capteur de référence un capteur à noyau d'air construit de telle manière que l'épaisseur bobinée soit très mince alors que le diamètre des spires est relativement grand. Cette précaution permet de diminuer l'erreur dans la mesure de la surface de la spire moyenne.

D'autre part, afin de diminuer les erreurs systématiques provenant de l'imperfection matérielle affectant le parallélisme des axes des deux capteurs durant l'enregistrement précédemment décrit, il suffit de recommencer plusieurs fois l'expérience en procédant chaque fois sur le terrain à un nouveau calage des capteurs.

Les gains g_1 et g_2 sont en général connus dans les amplificateurs à hautes performances au millième près, ce qui ne pourra ajouter que des erreurs négligeables. Par contre, on pourra répéter plusieurs fois les mesures en intervertissant les deux voies de l'enregistreur magnétique afin de diminuer toute erreur pouvant résulter d'une identité imparfaite entre les réponses de chacune de ces deux voies.

Quoi qu'il en soit, on peut espérer en définitive, grâce au procédé qui vient d'être exposé, atteindre une excellente précision dans l'étalonnage d'un capteur à induction avec noyau à forte perméabilité, et ce sans être tenu à aucun moment d'affronter le problème toujours délicat de la mesure directe du module du champ magnétique utilisé comme excitation.

Pour les calculs qui vont suivre, nous supposons donc connue la valeur χ_{Ca_2} du capteur magnétique qui nous servira à capter les variations du champ magnétique naturel, tandis que les variations correspondantes du champ tellurique seront enregistrées grâce à une chaîne de mesure comportant un appareil que nous nommerons « générateur de distorsions ».

c. Théorie du fonctionnement d'une chaîne tellurique équipée d'un générateur de distorsions.

La réalisation et le fonctionnement d'un capteur magnétique à induction étant maintenant précisés, nous allons décrire la composition d'une chaîne d'enregistrement tellurique comportant un générateur de distorsions, et voir par le calcul quelle est la nature desdites distorsions.

On supposera d'abord, bien entendu, que l'expérimentateur utilise, pour capter les variations du champ magnétique, le capteur magnétique à induction Ca_2 parfaitement défini, constitué d'une bobine de fil conducteur enroulé sur un noyau à forte perméabilité, et dont le coefficient de self-induction L , la résistance R et la capacité d'accord C sont considérés comme constants et connus. Cette bobine, qui a été étalonnée suivant le procédé déjà décrit, est placée à l'entrée d'un amplificateur A dont les bornes de sortie débitent dans une première voie d'entrée d'un enregistreur magnétique $E. M.$ (fig. 1, planche 28). L'amplificateur A a été judicieusement choisi pour sa forte impédance d'entrée, son rapport signal/bruit favorable ainsi que sa bonne linéarité. A ces qualités, on peut en ajouter une qui est le fait de n'introduire aucun déphasage parasite entre signaux d'entrée et signaux de sortie.

Parallèlement, on a représenté sur la même figure une chaîne tellurique où se trouve inséré un générateur de distorsions.

La tension existant naturellement dans le sol entre les deux points El_1 et El_2 , où sont plantées les électrodes, attaque un amplificateur du type A déjà présenté. Aux bornes de sortie de A est

relié le premier étage du générateur de distorsions qui est suivi lui-même du deuxième étage dudit générateur de distorsions. Vient ensuite à nouveau un amplificateur du type A qui est branché aux bornes d'entrée d'une deuxième voie de l'enregistreur magnétique E. M.

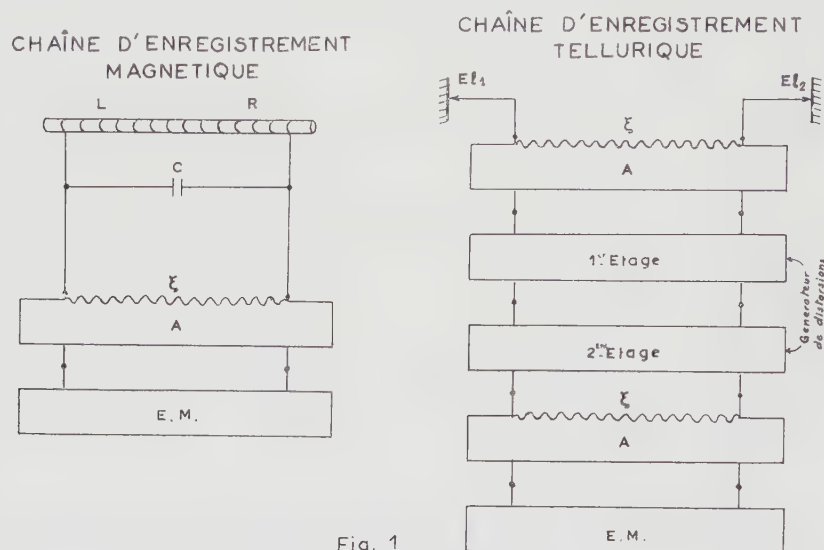


Fig. 1

DETAILS DU GENERATEUR DE DISTORSIONS

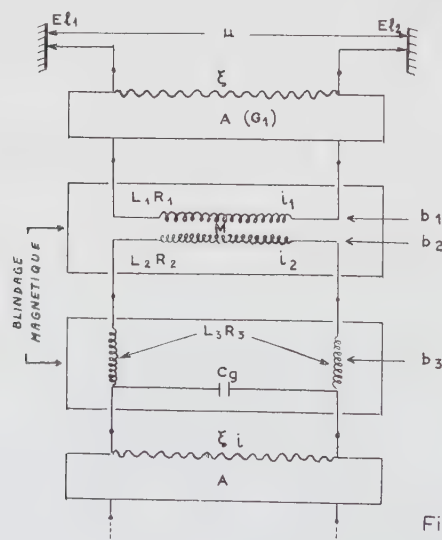


Fig. 2

PLANCHE 28.

Voyons maintenant de plus près en quoi consistent les deux étages du générateur de distorsions. Ainsi qu'on peut l'observer sur la figure 2 de la planche 28, le premier étage est une sorte de transformateur dont on verra plus loin les caractéristiques assez spéciales, comportant comme primaire un bobinage b_1 de self-induction L_1 et de résistance R_1 , comme secondaire un bobinage b_2 de self-

induction L_2 et de résistance R_2 . Entre les deux bobinages existe un coefficient d'induction mutuelle égal à M . On supposera au départ que les valeurs de L_1 , L_2 et M restent inchangées dans les conditions d'utilisation de l'appareil. L'ensemble, primaire et secondaire, est logé dans un ensemble de blindages magnétiques tels que les champs magnétiques extérieurs au blindage ne puissent induire dans l'une ou l'autre des bobines et que les paramètres L_1 , L_2 et M restent constants quels que soient les courants qui parcourent lesdites bobines. Le deuxième étage est constitué d'une bobine b_3 , possédant une self-induction L_3 et une résistance R_3 . Une capacité C_g est montée en parallèle sur b_3 . L'ensemble bobine et capacité est disposé à son tour dans un ensemble de blindages B analogue par ses propriétés au précédent. On constate que la tension existant aux bornes de b_2 est injectée directement en série dans b_3 . Quant aux bornes de sortie de b_3 , comme on l'a déjà dit, elles sont reliées aux bornes d'entrée d'un amplificateur de type A.

Voyons maintenant ce qui se passe lorsqu'une tension u est captée par l'intermédiaire des deux électrodes El_1 et El_2 disposées sur le terrain. Cette tension, lorsqu'elle correspond, comme ce fut en général le cas pour nous, à des variations naturelles de périodes relativement grandes, peut être assimilée sans risque d'erreur au produit de e , composante horizontale du champ tellurique suivant la direction $El_1 El_2$ par la distance l existant entre El_1 et El_2 . La tension qui va donc attaquer les bornes d'entrée du premier étage du générateur de distorsions sera donc égale à :

$$G_1 \cdot u = G_1 \cdot l \cdot e$$

Cette approximation est très précise compte tenu de la grandeur des périodes caractérisant les phénomènes considérés, G_1 étant le gain du premier amplificateur de type A situé sur la chaîne tellurique.

Si, maintenant, on examine les comportements des différents courants i_1 , i_2 et i circulant, ainsi qu'on le voit sur la figure 2 de la planche 28, dans les différents éléments du circuit, on est alors amené à écrire les différentes relations suivantes :

$$G_1 \cdot l \cdot e = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + \frac{M di_2}{dt}$$

$$(L_2 + L_3) \xi C_g \frac{d^2 i}{dt^2} + [\xi (R_2 + R_3) C_g + L_2 + L_3] \frac{di}{dt} + [R_2 + R_3 + \xi] i = -M \frac{di_1}{dt} \quad [3]$$

avec :

$$i_2 = i + C_g \xi \frac{di}{dt}$$

ξ désignant comme dans le cas des calculs concernant le capteur magnétique l'impédance d'entrée de l'amplificateur de type A.

Ce qui nous intéresse, c'est de connaître, en partant du système [3], quelle relation lie la tension ξi qui attaque le deuxième amplificateur A placé sur la chaîne tellurique à la tension u qui attaque les deux électrodes El_1 et El_2 . Ceci nous montrera quelles sont les distorsions en amplitude et en phase infligées à la tension u pour qu'elle se transforme en tension ξi .

Ainsi que nous l'avons annoncé au début de cet exposé, le fonctionnement de notre chaîne tellurique va de pair avec celui du capteur magnétique Ca_2 déjà présenté et caractérisé par les paramètres L , R et C .

Nous allons faire en sorte, dans le générateur de distorsions, que :

$$L_2 + L_3 = L \quad R_2 + R_3 = R \quad C_g = C$$

Le système [3] s'écrit alors :

$$\begin{aligned} G_1 \cdot l \cdot e &= R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} \\ L \xi C \frac{d^2 i}{dt^2} + (\xi RC + L) \frac{di}{dt} + (R + \xi) i &= -M \frac{di_1}{dt} \end{aligned} \quad [4]$$

avec :

$$i_2 = i + C \xi \frac{di}{dt}$$

L'examen de ces relations nous montre alors que la deuxième équation du système [4] rappelle étrangement l'équation caractéristique [1] qui régit le comportement du courant i dans l'impédance d'entrée de l'amplificateur situé aux bornes du capteur magnétique.

Malheureusement, l'excitation qui, dans ce cas du capteur magnétique, s'exprimait sous la forme $-\chi \frac{dh}{dt}$, c'est-à-dire était proportionnelle à la dérivée par rapport au temps du champ magnétique, devient ici, dans le cas du générateur de distorsions, égale à $-M \frac{di_1}{dt}$.

On peut alors légitimement être amené à penser que si l'on était capable de créer des conditions telles que le terme $-M \frac{di_1}{dt}$ devienne dans une excellente approximation proportionnel à $\frac{du}{dt}$, donc à $\frac{de}{dt}$, il en résulterait, de par la symétrie des relations utilisées, des simplifications utiles dans l'art de comparer quantitativement entre elles variations du champ magnétique et variations correspondantes du champ tellurique.

Pour préciser ce point de vue, nous allons en partant du système [4] exprimer i en fonction des différents paramètres de construction du générateur de distorsions et de e , et voir comment l'approximation qui vient d'être signalée est alors réalisable pratiquement.

Si l'on suppose que e se présente sous l'aspect d'une fonction périodique de pulsation $\omega = \frac{2\pi}{T}$, on pourra alors poser :

$$G_1 \cdot l \cdot e = E_1 \cos(\omega t + \theta)$$

Il en résulte que :

$$\begin{aligned} G_1 \cdot l \cdot e &= E_1 \cos(\omega t + \theta) \\ i_1 &= I_1 \cos \omega t \\ i &= I \sin(\omega t - \varphi) \\ i_2 &= I_2 \sin(\omega t + \psi - \varphi) \end{aligned}$$

avec :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{(L + \xi RC) \omega}{R + \xi - \omega^2 L \xi C} \quad \operatorname{tg} \psi = C \xi \omega$$

I s'exprime par rapport à I_1 :

$$I = \lambda I_1$$

avec :

$$\lambda = \frac{M \omega}{\sqrt{(R + \xi)^2 + (L^2 - 2\xi^2 LC + R^2 \xi^2 C^2) \omega^2 + L^2 \xi^2 C^2 \omega^4}}$$

et :

$$I_1 = \frac{E_1}{\left[(R_1 + M\omega\lambda\sqrt{1 + C^2\xi^2\omega^2} \cos(\psi - \varphi))^2 + (L_1\omega + M\omega\lambda\sqrt{1 + C^2\xi^2\omega^2} \sin(\psi - \varphi))^2 \right]}$$

Enfin, $\operatorname{tg} \theta$ s'écrit alors :

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{L_1\omega + M\omega\lambda\sqrt{1 + C^2\xi^2\omega^2} \sin(\psi - \varphi)}{R_1 + M\omega\lambda\sqrt{1 + C^2\xi^2\omega^2} \cos(\psi - \varphi)}$$

Si l'on examine ces relations, on constate, après avoir fait le choix du spectre que l'on désire enregistrer, que le meilleur moyen de faire entrer dans les faits l'approximation envisagée plus haut consiste à jouer sur les différents termes en présence jusqu'à ce que I_1 devienne pratiquement égal à $\frac{E_1}{R_1}$, ce qui revient d'ailleurs à rendre $\operatorname{tg} \theta$ aussi petit que possible. La bande de fréquence utile étant déterminée, il faut alors se livrer à une série d'études technologiques successives, car le problème posé porte en lui des contradictions qui font automatiquement converger vers une réalisation moyenne.

En effet, pour atteindre le but proposé, il sera alors nécessaire que les termes en $M\omega\lambda\sqrt{1 + C^2\xi^2\omega^2}$ deviennent très petits devant R_1 et $L_1\omega$. En outre, $L_1\omega$ devra à son tour être très petit devant R_1 . Or, par ailleurs, il y aura toujours intérêt à rendre le coefficient d'induction mutuelle aussi grand que possible puisque I est proportionnel à M . Malheureusement, M est en gros proportionnel à $\sqrt{L_1}$, quel que soit le type de bobinage utilisé pour constituer le premier étage du générateur de distorsions. En conséquence, rendre à la fois $L_1\omega$ très petit et M très grand sont deux conditions qui s'excluent mutuellement. Il faut donc que l'expérimentateur s'en tienne à une solution intermédiaire.

d. Exemple de réalisation d'une chaîne tellurique équipée d'un générateur de distorsions. Étalonnages.

α. La réalisation.

Pour mieux préciser ces considérations, on trouvera sur la planche 29 un tableau donnant les valeurs numériques des différents paramètres et termes caractérisant un exemple concret de réalisation de générateur de distorsions. Conjointement à ce tableau figure la courbe de réponse en fonction de la fréquence de cet appareil, l'excitation étant constituée par une tension harmonique, de module constant égal à 0,1 V mais de fréquence variable, placée aux bornes d'entrée du premier étage.

Le lecteur pourra constater l'excellente superposabilité existant entre la courbe de réponse du générateur de distorsions qui vient d'être présenté et la courbe de réponse du capteur magnétique que nous avons appelé Ca_2 , cette superposabilité n'intervenant naturellement qu'à un calage près en ordonnée. Or, c'était là précisément le but que nous recherchions. Nous verrons un peu plus loin les simplifications remarquables qu'apporte cette situation dans la détermination du rapport E/H . En attendant, nous nous proposons de montrer brièvement comment nous procédons pour obtenir pratiquement une identité aussi poussée que celle existant respectivement entre les deux courbes de réponses dont il vient d'être question. Ce sera là la définition d'un ensemble de mesures simples constituant le deuxième et dernier stade dans l'étalonnage de nos chaînes d'enregistrement magnétique et tellurique, le premier stade, défini par la mesure du coefficient χ_{Ca_2} , ayant déjà été traité.

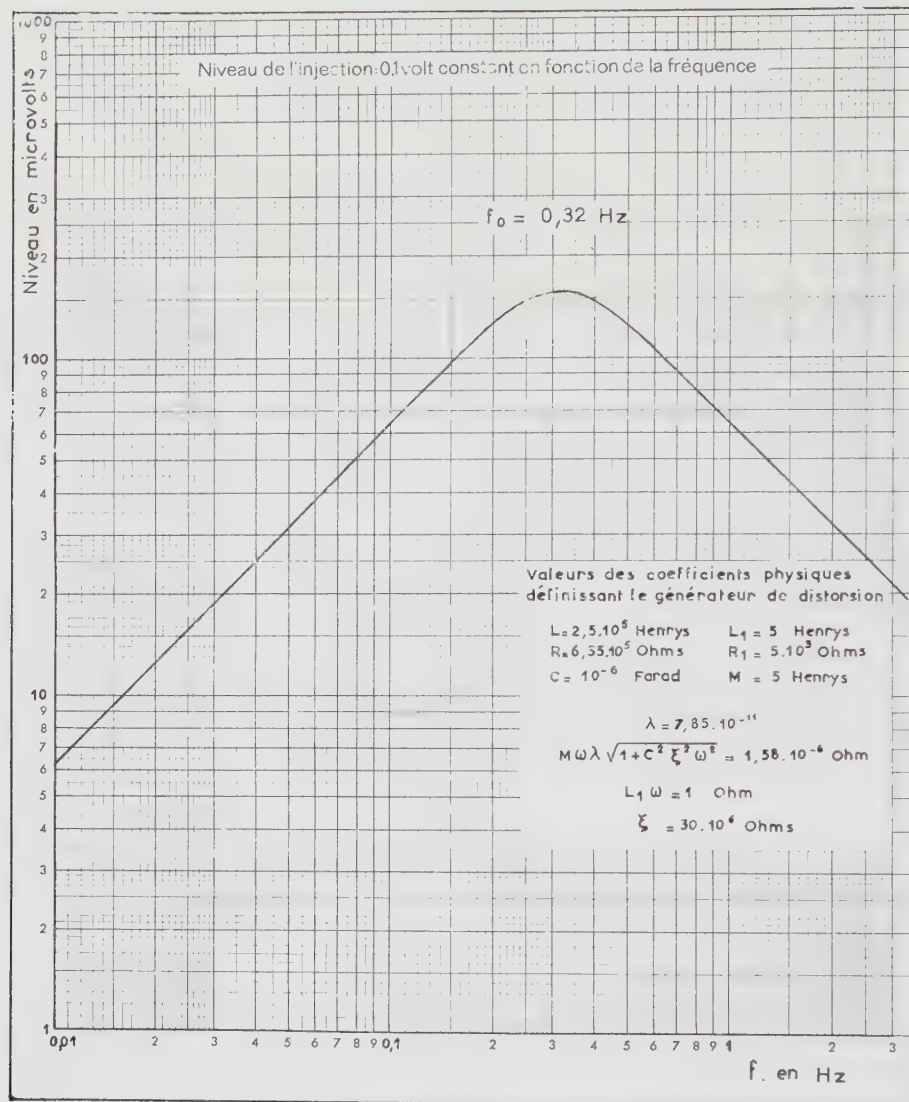


PLANCHE 20.

Courbe de réponse du générateur de distorsion.

β . Étalonnage.

Lorsqu'au préalable, compte tenu de l'étendue du spectre que l'on juge nécessaire d'utiliser, on a pris soin de faire en sorte que $I_1 = \frac{E_1}{R_1}$ avec une approximation déjà en général de l'ordre de 10^{-3} pour la fréquence la plus élevée du spectre en question, cette nouvelle série d'étalonnages se décompose essentiellement en trois parties, dont l'énumération ne correspond d'ailleurs pas, comme on va le voir, à l'ordre chronologique. Il faut obtenir une identité aussi parfaite que possible, tout

d'abord entre le coefficient de self-induction du capteur Ca_2 et celui $L = L_2 + L_3$ du générateur de distorsions, puis ensuite entre la résistance de fonctionnement de Ca_2 et celle $R = R_2 + R_3$ du générateur de distorsions, et enfin entre les deux capacités d'accord intervenant respectivement en parallèle sur les deux appareils. La réalisation de l'identité entre coefficients de self-induction est l'opération la plus délicate. On part comme donnée de base du fait que la self du capteur Ca_2 est une qualité intrinsèque de ce capteur ne dépendant que de ses caractéristiques physiques : on ne peut donc songer à changer cette self sans déformer le capteur lui-même. C'est alors sur $L = L_2 + L_3$ que l'on va agir pour obtenir l'identité désirée.

Ayant décidé la fréquence supérieure de fonctionnement de Ca_2 , on détermine la capacité d'accord correspondante, pour laquelle on choisit alors à vrai dire la valeur la plus proche existant dans la technologie. La capacité que nous avons retenue est, comme on le sait, $2 \cdot 10^{-6}$ F. Cette valeur est assez importante, mais ce qui est remarquable, c'est qu'elle est au moins mille fois plus forte que la capacité répartie de construction inhérente au capteur Ca_2 . Comme, d'autre part, il est possible de se procurer des capacités de très bonne qualité qui, pour de telles valeurs, sont garanties au millième par le fabricant, voilà qui résout en passant la question de l'identité entre capacités : il suffit en effet de s'en procurer une autre du même type et de même valeur indiquée pour le générateur de distorsions. En effet, la remarque précédente sur la capacité répartie étant encore valable pour ce dernier appareil, il en ressort que l'on a alors entre les deux chaînes une identité en capacité de l'ordre de 1/500, ce qui est très suffisant.

Si l'on revient maintenant au capteur Ca_2 , on constate que sa résistance naturelle est nettement inférieure à celle indiquée sur le tableau de la planche 27. Cela revient à dire que si, avec cette résistance, on trace la courbe de réponse de Ca_2 shunté par la même capacité que précédemment, nous obtiendrons une allure beaucoup plus pointue que celle de la courbe de réponse d'utilisation que nous avons présentée. On décide alors d'affecter momentanément à la résistance $R_2 + R_3$ du générateur de distorsions la valeur de la résistance naturelle du capteur, ce qui est très aisé avec un bon pont de mesure, et on procède selon le montage qui est indiqué sur la planche 30.

On utilise un générateur T.B.F. qui envoie la même tension harmonique sous très basse impédance ($< 0,5 \Omega$) en même temps dans Ca_2 et dans le circuit $(L_2 + L_3)$ du générateur de distorsions. Les courbes de résonance des deux appareils sont alors tracées de manière synchrone et, comme les résonances sont assez prononcées, il est très facile de voir s'il y a un décalage des deux fréquences de résonance. On modifie alors $L = L_2 + L_3$ jusqu'à ce que ce décalage disparaisse : les courbes ainsi obtenues se superposent alors parfaitement bien. Pour se rassurer, il est recommandé de répéter la manipulation pour d'autres fréquences d'accord, en jouant sur la valeur des capacités.

C'est alors qu'est choisie définitivement la résistance de fonctionnement des appareils qui est telle qu'à la fréquence de résonance retenue, l'impédance de chaque appareil (capteur Ca_2 et générateur de distorsions) soit égale à sa résistance.

Cela entraîne l'élimination de toute hypertrophie de la courbe de résonance, mais permet en revanche une perfection encore plus poussée dans l'identité des courbes de réponse. Il peut sembler regrettable de renoncer à une forte résonance qui peut passer pour être synonyme de sensibilité. En fait, c'est une sensibilité souvent illusoire qui se paie par l'introduction de la part de l'appareillage de réponses transitoires qui peuvent fortement dénaturer les rapports E/H obtenus expérimentalement.

Nous ajouterons enfin que l'exemple de chaînes d'enregistrement tellurique et magnétique qui vient d'être donné a été conçu pour enregistrer essentiellement les fréquences à gauche de la fréquence de résonance qui est $f_0 = 0,32$ Hz, ce qui nous donne, en périodes, le spectre défini par $3,15 \text{ s} < T < \infty$.

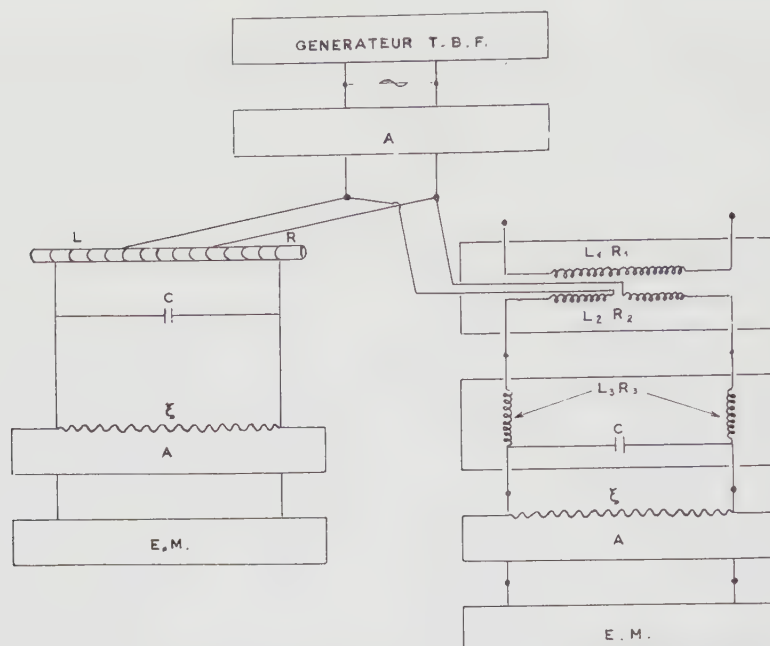


PLANCHE 30.

Dispositif permettant d'obtenir des réponses identiques sur les deux chaînes d'enregistrement.

e. Les avantages du système de mesure.

α. Simplification des relations expérimentales donnant le rapport E/H et le décalage de phase.

On a vu que des distorsions profondes d'amplitude et de phase, qui affectent l'ensemble de la chaîne d'enregistrement magnétique entre le signal naturel d'entrée et le signal enregistré de sortie, étaient déterminées par les divers éléments de la chaîne et s'exprimaient sous la forme de fonctions compliquées de période T. Les distorsions provenant d'une chaîne tellurique quelconque sont aussi pour leur part des fonctions plus ou moins compliquées de T et ces distorsions telluriques sont *a priori* sans rapport simple avec les distorsions magnétiques, lorsqu'on ne prend pas de dispositions particulières pour y remédier.

Le présent procédé permet précisément, grâce aux moyens qui viennent d'être décrits, d'amener les distorsions incriminées à être en relation simple les unes par rapport aux autres, de telle façon que, pour chaque période T considérée isolément, les distorsions magnétiques et telluriques deviennent sinon identiques, mais du moins en relation simple, si possible une proportionnalité, les unes par rapport aux autres, et qu'on puisse déduire aussitôt simplement, rapidement et avec sécurité, à partir des données enregistrées à la sortie des deux chaînes, le rapport E/H et la différence de phase entre les signaux naturels à l'entrée.

C'est ainsi que dans l'exemple présenté, dans le spectre de fonctionnement annoncé $3,15 \text{ s} < T < \infty$, le rapport d'amplitude du champ tellurique au champ magnétique se trouve multiplié par une constante $\mathcal{K}$, lorsque l'on passe du signal naturel au signal enregistré de sortie. La valeur de cette constante est indépendante de T, mais dépend uniquement des éléments constitutifs des deux chaînes. Elle s'exprime ici par :

$$\mathcal{K} = \frac{Z_{\text{co2}}}{l} \cdot \frac{G_{\text{mag}}}{G_{\text{tel}}} \cdot \frac{R_1}{M}$$

R_1 : est la résistance de b_1 intervenant dans le générateur de distorsions ;

M : le coefficient d'induction mutuelle ;

l : la distance entre les électrodes ;

G_{mag} : la somme des gains affichés dans la chaîne magnétique ;

G_{tel} : la somme des gains affichés dans la chaîne tellurique.

Quant au décalage de phase existant entre champ électrique et champ magnétique, il reste identique à lui-même lorsque l'on passe du signal naturel au signal enregistré de sortie.

Nous allons établir rapidement ces relations et voir leur application sur un exemple concret d'analyse de variations naturelles enregistrées selon le système décrit.

Revenons en effet à l'expression de la tension telle qu'elle s'inscrit en fin de parcours de la chaîne d'enregistrement magnétique, au moment où elle se fixe sur la bande magnétique, l'excitation extérieure étant due à un champ magnétique harmonique de période T et de forme $h = H \cos \omega t$.

Cette tension s'écrit en faisant intervenir les notations du chapitre I :

$$U_{\text{mag}}(t) = G_{\text{mag}} \cdot \frac{\xi \cdot \chi_{\text{ca2}} \cdot H \cdot \omega}{\Xi} \sin(\omega t - \varphi)$$

Le module :

$$G_{\text{mag}} \cdot \frac{\xi \cdot \chi_{\text{ca2}} \cdot H \cdot \omega}{\Xi}$$

s'identifie au terme que nous avons déjà exprimé par le symbole $W_T(t)$ et, dans le cas particulier envisagé, reste constant en fonction du temps.

Considérons l'expression de la tension correspondante telle qu'elle s'inscrit sur la bande magnétique en fin de parcours de la chaîne d'enregistrement tellurique. Le champ électrique exciteur est également harmonique de période T et se présente sous la forme :

$$e = E \cos(\omega t + \theta)$$

θ étant négligeable, on a alors le droit d'écrire :

$$e = E \cos \omega t$$

Cette tension s'écrit :

$$U_{\text{tel}}(t) = G_{\text{tel}} \cdot \frac{\xi \cdot M \cdot l \cdot E \cdot \omega}{R_1 \cdot \Xi} \sin(\omega t - \varphi)$$

avec :

$$V_T(t) = G_{\text{tel}} \cdot \frac{\xi \cdot M \cdot l \cdot E \cdot \omega}{R_1 \cdot \Xi}$$

$V_T(t)$ est également une constante par rapport au temps.

Le rapport des modules $W_T(t)/V_T(t)$ s'exprime alors :

$$\frac{W_T(t)}{V_T(t)} = \frac{\chi_{\text{ca2}}}{l} \cdot \frac{H}{E} \cdot \frac{G_{\text{mag}}}{G_{\text{tel}}} \cdot \frac{R_1}{M}$$

ou :

$$\frac{E}{H} = \frac{\chi_{\text{ca2}}}{l} \cdot \frac{V_T(t)}{W_T(t)} \cdot \frac{G_{\text{mag}}}{G_{\text{tel}}} \cdot \frac{R_1}{M} \quad [5]$$

Cette relation restera valable quelle que soit la période T .

Voyons maintenant ce qui se passe pour le décalage de phase : dans la mesure où les constituants

des chaînes d'enregistrement autres que le capteur Ca_2 et le générateur de distorsions (amplificateurs, voie d'enregistrement magnétique) n'introduisent pas de déphasage, ou bien introduisent les mêmes déphasages sur chaque voie, le décalage de phase existant entre les tensions $U_{tel}(t)$ et $U_{mag}(t)$, telles qu'elles se manifestent en bout de chaîne d'enregistrement, sera identique à celui existant entre les variations des champs excitateurs magnétique et tellurique. C'est ce qui apparaît clairement sur les relations explicitées plus haut où $U_{tel}(t)$ et $U_{mag}(t)$ ne présentaient pour des excitations synchrones aucun décalage de phase.

β. Simplification dans l'application des relations précédentes.

Partant des bandes magnétiques, nous procédons, période par période, à un filtrage analogique des enregistrements selon le mode d'opérations qui ont été décrites au chapitre I, sous les rubriques « Analyse des tensions enregistrées » et « Détermination des rapports E/H ». On peut observer sur les planches 2, 3 et 4 les résultats d'une telle analyse (voir première partie).

Prenant comme matériau de base l'enregistrement brut de la chaîne magnétique et l'enregistrement brut correspondant de la chaîne tellurique effectués à l'occasion d'un sondage pris au hasard, nous avons alors représenté successivement pour différentes périodes les tensions obtenues après filtration.

Comme on peut le constater, les tensions en question pour une période T donnée sont loin d'être des constantes en fonction du temps. Aussi, après choix sur les deux voies pour chaque période d'intervalle $\Delta t = t_2 - t_1$ ou lesdites tensions corréllent particulièrement bien, nous avons substitué à la relation précédente [5], valable seulement en régime harmonique, une nouvelle relation qui fait intervenir des intégrales qui peuvent se calculer graphiquement ou analogiquement :

$$\frac{E}{H} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} V_T(t) dt}{\int_{t_1}^{t_2} W_T(t) dt} \cdot \frac{Z_{Ca_2}}{l} \cdot \frac{G_{mag}}{G_{tel}} \cdot \frac{R_1}{M}$$

Ce qui s'écrit encore :

$$\frac{E}{H} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} V_T(t) dt}{\int_{t_1}^{t_2} W_T(t) dt} \cdot \frac{Z_{Ca_2}}{l} \cdot \frac{G_{mag}}{G_{tel}} \cdot \frac{R_1}{M}$$

En fait, ainsi qu'on l'a vu dans la première partie, compte tenu du procédé de filtration utilisé, on a accès dans la pratique non pas directement à $V_T(t)$ et $W_T(t)$, mais à $k_1 \cdot V_T(t)$ et $k_2 \cdot W_T(t)$, les termes k_1 et k_2 étant alors des constantes dont on connaît parfaitement la valeur. Le plus souvent d'ailleurs, si l'on a pris soin d'enregistrer les tensions $U_{tel}(t)$ et $U_{mag}(t)$ avec des niveaux à peu près égaux entre eux, il n'y a aucune raison d'introduire au cours des opérations de filtration des coefficients d'amplifications différents d'une voie à l'autre, et par conséquent k_1 devient égal à k_2 , ce qui permet une légère simplification puisque k_1/k_2 est alors égal à 1.

L'expérience nous a montré que les rapports E/H ainsi obtenus restaient remarquablement constants pour une période donnée et ce, quel que soit l'intervalle Δt considéré. Pour illustrer cette affirmation par un exemple, nous donnons sur les planches 2, 3 et 4 (voir première partie) une liste des valeurs des rapports des surfaces correspondantes découpées en déterminant pour chaque période T différents intervalles de temps Δt sur les tensions magnétiques et telluriques représentées en fonction du temps sur les mêmes planches. On a également fait figurer les valeurs de résistivité apparente qui

découlent des rapports de surfaces ci-dessus définis. Cette question nous amène en passant à faire allusion à la dispersion invoquée par certains auteurs dans la détermination du rapport E/H pour une période donnée en un lieu donné. Nous répéterons ce que nous venons de dire plus haut : c'est-à-dire que, dans les lieux où nous avons prospecté, chaque fois qu'un enregistrement a pu être effectué avec un niveau naturel suffisamment grand par rapport au bruit de fond de l'appareillage et qu'il n'était pas troublé par des parasites quelconques, nous n'avons jamais rencontré de dispersion dans les valeurs du rapport E/H retenu.

Nous ajouterons quelques mots à propos du décalage de phase. En effet, compte tenu de l'excellente qualité des corrélations caractérisant les tensions filtrées que nous avons présentées, il serait possible d'espérer extraire des décalages de phases qui soient conformes à ceux prévus par la théorie. Malheureusement, rappelons-le, les filtres que nous avons utilisés sont analogiques et leur utilisation nécessite une telle contraction du temps à partir de l'enregistrement initial que les décalages de phases à mesurer représentent alors des intervalles de temps si faibles qu'ils deviennent de l'ordre des erreurs pourtant minimes affectant l'identité des réponses entre les deux canaux de l'enregistreur magnétique en particulier.

γ. Autres avantages.

Nous terminerons en signalant deux avantages d'ordre pratique, mais non négligeables pour autant, apportés par l'utilisation d'un générateur de distorsions.

Tout d'abord, on sait que le module du champ tellurique a tendance à s'accroître vers les grandes périodes. L'expérimentateur qui utilise une chaîne d'enregistrement tellurique quelconque se trouve en présence de variations dont les amplitudes moyennes sont très différentes selon la période T , ce qui nécessite un découpage du spectre en plusieurs bandes pour permettre des enregistrements compatibles avec la dynamique relativement faible des enregistreurs magnétiques analogiques.

L'emploi du générateur de distorsions égalise à peu près les niveaux des tensions à enregistrer, ce qui permet d'enregistrer d'un seul coup les variations naturelles correspondant à un très large spectre allant par exemple de 400 s (et plus si on le désire) à 3,15 s.

Cette propriété du générateur de distorsions de réduire les niveaux à mesure que les périodes s'accroissent présente l'avantage de donner une réponse nulle pour une période qui serait infinie.

Cela est important pour le géophysicien qui pratique la mesure magnéto-tellurique systématiquement : en effet, on élimine ainsi les tensions continues ou pseudo-continues qui s'établissent fréquemment entre électrodes pour des raisons qui n'ont rien à voir avec l'électromagnétisme, mais qui sont dues à des polarisations électrolytiques. On résout donc du même coup le problème des électrodes impolarisables et on évite surtout les filtres RC à constantes de temps énormes qui ont la malencontreuse propriété de donner lieu à des pulsations transitoires fort gênantes, consécutives à la moindre variation naturelle ou artificielle un peu brutale.

L'auteur exprime sa reconnaissance à la Direction de la *S. N. Repal*, qui a bien voulu l'autoriser à utiliser des résultats de mesures, intervenant dans cette publication.

(Fin.)

Manuscrit reçu en octobre 1969.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) CAGNIARD (L.). — Principe de la méthode magnéto-tellurique, nouvelle méthode de prospection géophysique. *Annales de Géophysique*, 1953, tome **9**, fasc. 2, p. 95-125.
- (2) CAGNIARD (L.). — Basic theory of the magneto-telluric method of geophys. prosp. *Geophysics* 18, 1953, 605. *Handbuch der Physik*, vol. **XLVII**, Geophysik I, p. 407-469.
- (3) FRANK (P. u.) von MISES (R.). — Die Differential und Integralgleichungen der Mechanik und Physik. Braunschweig : Vieweg u. Sohn, 2 Aufl., Bd **1**, 1930 ; Bd **2**, 1935.
- KATO (Y.) et KIKUCHI (T.). — *Sci. Rep. Tôhoku. Univ. Ser. V. Geophysics*, 1950, 2, 139.
- RIKITAKE (T.). — *Bull. Earthquake Re. Inst. Tokyo Univ.*, 1950, 28, 45 ; 1950, 28, 219 ; 1951, 29, 61 ; 1951, 29, 271.
- TIKHONOV (A. N.). — *Dokl. Akad. Nauk. S. S. S. R.*, 1950, 73, 295.
- (4) MUSÉ (L. M.). — Dispositif de mesure applicable en particulier à la prospection magnéto-tellurique. Brevet français n° 1 443 930 déposé au nom du C. N. R. S. Measuring Device. Brevet déposé aux États-Unis au nom du C. N. R. S. sous le n° 531 240. Brevet déposé en Angleterre au nom du C. N. R. S. sous le n° 1 440 893.

